



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Πολυκυματική Πηγή Laser για Δίκτυα  
Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος (WDM)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευθύμιος Ι. Ρούβαλης

**Επιβλέπων :** Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Αναπ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2007





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Πολυκυματική Πηγή Laser για Δίκτυα Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος (WDM)

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευθύμιος Ι. Ρούβαλης

**Επιβλέπων :** Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Αναπ. Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30<sup>η</sup> Μαΐου 2007.

.....  
Αβραμόπουλος Η.  
Αναπ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ουζούνογλου Ν.  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Κακλαμάνη Δ.-Θ.  
Αναπ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2007

.....  
Ευθύμιος Ι. Ρούβαλης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ευθύμιος Ι. Ρούβαλης  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

**Περίληψη:**

Η Πολυπλεξία Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing) είναι πλέον αποδεκτό ότι αποτελεί μια αξιόπιστη τεχνική για την αύξηση του συνολικού Ρυθμού Μετάδοσης μέσα σε μια Οπτική Ζεύξη καθώς και την αποδοτικότερη διαχείριση του διατιθέμενου εύρους ζώνης. Οι απαιτήσεις που αφορούν τις πηγές Laser είναι ιδιαίτερα υψηλές και έτσι προκύπτει η ανάγκη για οπτικές πηγές με υψηλή επίδοση και σταθερότητα. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε μιας Αμιγώς Οπτική Πολυκυματική Πηγή που εκμεταλλεύεται αμιγώς οπτικά στοιχεία για την παραγωγή ενός μεγάλου αριθμού καναλιών. Η προτεινόμενη Πολυκυματική Πηγή αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία:

1. Ένα Mode – Locked CW Laser τύπου ERGO.
2. Έναν Ενισχυτή Ίνας Ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifier).
3. Μια Οπτική Ίνα Κρυσταλλικής Δομής (Photonic Crystal Fiber).
4. Ένα Συμβολόμετρο Fabry – Péroτ.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν τα οπτικά φάσματα σε κάθε σημείο της διάταξης, τα μικροκυματικά φάσματα και τη σταθερότητα των καναλιών. Στη συνέχεια, απομονώθηκαν ορισμένα από αυτά και διαμορφώθηκαν με  $2^{31} - 1$  PRBS στα 10 Gbps όπου λήφθηκαν eye diagrams και έγιναν μετρήσεις BER. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η συμπεριφορά της πηγής σε συνθήκες μετάδοσης, συγκριτικά και με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, είναι εξαιρετική. Η συγκεκριμένη διάταξη ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες εφαρμογές όπως την ανύψωση της φέρουσας συχνότητας ενός σήματος αλλά και ως πηγή παραγωγής σημάτων εύρους ζώνης της τάξης των THz που χρησιμεύει στην απεικόνιση βιολογικών ιστών.

**Λέξεις Κλειδιά:** Πολυπλεξία Μήκους Κύματος, Πολυκυματική Πηγή, ERGO Laser, Οπτική Ίνα Κρυσταλλικής Δομής, Συμβολόμετρο Fabry – Péroτ, Supercontinuum, Φασματικός Διαχωρισμός, Δίκτυα DWDM.



**Abstract:**

Nowadays, it is widely acceptable that Wavelength Division Multiplexing is an exceptional technique resulting in the increase of the total Bit Rate through an Optical Link, as well as the efficient management of the total bandwidth available. The requirements for Laser Sources to be met are strictly specified, leading to the need for Optical Sources with high performance and stability. In the context of this dissertation, an All – Optical Multiwavelength Laser Source, consisting of All – Optical devices, was realised in order to produce a plethora of wavelength channels. Four fundamental optical devices are key elements in the Multiwavelength Source proposed:

1. A Mode – Locked CW ERGO Laser.
2. A High – Power Erbium Doped Fiber Amplifier.
3. A Photonic Crystal Fiber.
4. A Fabry – Pérot Interferometer.

Measurements of the optical spectra, the microwave spectra and the stability of the channels were taken. Additionally, some of the channels were isolated and modulated at 10 Gbps rate with  $2^{31} - 1$  PRBS where eye diagrams and BER measurements were taken as well. Experimental results in terms of transmission have shown that the Multiwavelength Source's efficiency, in comparison with the simulation results, is excellent. However, the source proposed can be useful in many other applications, having the potential to upgrade the repetition rate of an optical signal and to become an optical source producing signals in the THz frequency regime. These signals are of high importance to biological tissue imaging applications.

**Key words:** Wavelength Division Multiplexing, DWDM Networks, Multiwavelength Source, ERGO Laser, Photonic Crystal Fibre, Supercontinuum, Fabry – Pérot Interferometer, Spectral Slicing.





## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το κλείσιμο ενός κύκλου στη ζωή μου όντας φοιτητής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για τα τελευταία χρόνια.

Οι ευκαιρίες που μπορεί κανείς να συναντήσει στη ζωή ώστε να διευρύνει τόσο πολύ τους ορίζοντές του μέσα σε ένα τόσο μικρό χρονικό διάστημα, όσο αυτό των πέντε ετών που υπήρξα φοιτητής, είναι σπάνιες. Θέλω να πιστεύω ότι μέσα στο Πολυτεχνείο κέρδισα κάτι παραπάνω από τεχνική και επιστημονική γνώση. Σε αυτό το «παραπάνω» συνέβαλε τα μέγιστα η συναναστροφή μου με αξιόλογους ανθρώπους που διαθέτουν περίσσεια συνείδησης και διάθεσης για αυτό που κάνουν είτε αυτοί είναι καθηγητές, είτε συμφοιτητές.

Αυτό είναι το κλίμα που συνάντησα από την πρώτη στιγμή στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών. Για το λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο για την επίβλεψη της Διπλωματικής Εργασίας αυτής. Η θέλησή του και η πολύτιμη καθοδήγησή του δεν θα μπορούσαν να αποτελέσουν τίποτα άλλο παρά πηγή έμπνευσης. Το ίδιο ισχύει και για όλα τα υπόλοιπα μέλη του Ε.Φ.Ε. και ιδιαιτέρως τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Παρασκευά Μπακόπουλο για τη βοήθειά του στην πραγματοποίηση της εργασίας αυτής και τις χρήσιμες συμβουλές του. Το ζωντανό αυτό κύτταρο του Ε.Φ.Ε. είναι ίσως η καλύτερη επιλογή για έναν φοιτητή που αναζητά κάτι παραπάνω από την απλή εκπόνηση μιας Διπλωματικής Εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Ιωάννη και Ειρήνη Ρούβαλη, όπως και την αδερφή μου Νίνα, για την υποστήριξη και την αμέριστη συμπαράσταση που μου προσέφεραν απλόχερα όλα αυτά τα χρόνια. Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω όσους φίλους και συμφοιτητές ήταν συνοδοιπόροι σε αυτό το σύντομο αλλά συναρπαστικό ταξίδι.



# Περιεχόμενα:

<i>Περίληψη</i> .....	5
<i>Abstract</i> .....	7
<i>Ευχαριστίες</i> .....	9
<i>Περιεχόμενα</i> .....	11

## Κεφάλαιο 1: Οπτικά Ευρυζωνικά Δίκτυα

<i>1.1</i> Εισαγωγή.....	16
<i>1.2</i> Δίκτυα Οπτικών Ινών.....	20
<i>1.2.1</i> Οπτικά Δίκτυα Πρώτης Γενιάς.....	20
<i>1.2.2</i> Οπτικά Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς.....	22
<i>1.2.3</i> Οπτικά Δίκτυα Τρίτης Γενιάς.....	27
<i>1.2.3.1</i> Οπτική Μεταγωγή Εκρηκτικής Ροής (OBS).....	28
<i>1.2.3.2</i> Οπτική Μεταγωγή Πακέτου (OPS).....	29
<i>1.2.3.3</i> Οπτική Μεταγωγή Ετικέτας (OLS).....	30
<i>1.3</i> Τα Οπτικά Δίκτυα του μέλλοντος.....	32
<i>1.4</i> Αναφορές 1 <sup>ο</sup> Κεφαλαίου.....	35

## Κεφάλαιο 2: Πολυπλεξία Μήκους Κύματος (WDM): Τοπολογίες και Διατάξεις

<i>2.1</i> Εισαγωγή.....	40
<i>2.2</i> Συστήματα Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM)..	41
<i>2.2.1</i> Τοπολογίες Δικτύων WDM.....	43
<i>2.2.1.1</i> Ζεύξεις Σημείου – προς – Σημείο Υψηλής Χωρητικότητας.....	43
<i>2.2.1.2</i> Δίκτυα Ευρείας και Μητροπολιτικής Ζώνης....	45
<i>2.2.1.3</i> Δίκτυα Πολλαπλής Πρόσβασης.....	46
<i>2.2.2</i> Διατάξεις Δικτύων WDM.....	47
<i>2.2.2.1</i> Οπτικές ίνες.....	48
<i>2.2.2.2</i> Οπτικά Φίλτρα.....	48
<i>2.2.2.3</i> Αμιγώς Οπτικοί Ενισχυτές.....	52
<i>2.2.2.4</i> Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθήκης/Αφαίρεσης..	54

2.2.2.5 Παθητικός Συζεύκτης Αστέρα.....	55
2.2.2.6 Δρομολογητές Μήκους Κύματος.....	55
2.2.2.7 Μετατροπείς Μήκους Κύματος.....	56
2.2.2.8 Οπτικά Στοιχεία Διασύνδεσης.....	57
2.2.2.9 Πομποί/Δέκτες για Συστήματα WDM.....	58
2.3 Συστήματα Οπτικής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Χρόνου (OTDM)	59
2.3.1 Τοπολογίες Δικτύων OTDM.....	60
2.3.2 Διατάξεις Δικτύων OTDM.....	63
2.3.2.1 Πομποί και Δέκτες OTDM.....	63
2.3.2.2 Διατάξεις Ανάκτησης Ρολογιού.....	64
2.3.2.3 Αμιγώς Οπτικοί Αναγεννητές.....	64
2.3.2.4 Διατάξεις Αμιγώς Οπτικής Ψηφιακής Λογικής.....	65
2.3.2.5 Διατάξεις Ενταμιευτών.....	65
2.3.2.6 Διακόπτες Οπτικής Μεταγωγής.....	65
2.4 Συστήματα Πολυπλεξίας Υπο-φέροντος (SCM).....	66
2.5 Συστήματα Πολυπλεξίας Διαίρεσης Κώδικα (CDM).....	66
2.6 Αναφορές 2 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	68

### **Κεφάλαιο 3: Πολυκυματικοί Πομποί για Δίκτυα DWDM**

3.1 Εισαγωγή.....	74
3.2 Lasers Πολλαπλών Καναλιών.....	75
3.2.1 Lasers τύπου DFB/DBR.....	75
3.2.2 Lasers τύπου VCSEL.....	77
3.2.3 Υλοποιήσεις Συστοιχιών Πολυκαναλικών Laser.....	78
3.2.4 Πολυσυχνотικά Laser.....	78
3.2.5 Συντονιζόμενα Laser.....	79
3.3 Πολυκυματικές Πηγές.....	80
3.3.1 Πηγές Αντλησης Οπτικής Ισχύος.....	82
3.3.2 Φασματική Εξάπλωση – Δημιουργία Supercontinuum..	83
3.3.2.1 Διάδοση Παλμών μέσα από Οπτική Ίνα.....	85
3.3.2.2 Τεχνικές Παραγωγής Supercontinuum.....	92
3.3.3 Φασματικός Διαχωρισμός.....	97
3.4 Αναφορές 3 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	100

**Κεφάλαιο 4: Θεωρητική Ανάλυση Πολυκυματικής Πηγής DWDM**

<b>4.1</b>	Εισαγωγή.....	106
<b>4.2</b>	Ανάλυση λειτουργίας του Laser ERGO.....	107
<b>4.2.1</b>	Θεωρία Ταλάντωσης Laser.....	107
<b>4.2.2</b>	Τεχνική Κλειδώματος Τρόπων Ταλάντωσης (Mode – Locking).....	112
<b>4.2.2.1</b>	Ενεργό Κλείδωμα Τρόπων Ταλάντωσης (Active Mode Locking).....	114
<b>4.2.2.2</b>	Παθητικό Κλείδωμα Τρόπων Ταλάντωσης (Passive Mode Locking).....	116
<b>4.2.3</b>	Κατασκευαστικές παράμετροι του ERGO laser και λειτουργία.....	120
<b>4.3</b>	Ανάλυση λειτουργίας Οπτικής Ίνας PCF.....	122
<b>4.3.1</b>	Δομή οπτικής ίνας PCF.....	122
<b>4.3.2</b>	Ανάλυση Οπτικών Ινών PCF.....	124
<b>4.3.2.1</b>	Κυματοδήγηση σε PCF.....	125
<b>4.3.2.2</b>	Εξασθένιση σε PCF.....	127
<b>4.3.2.3</b>	Φαινόμενα Διασποράς σε PCF.....	128
<b>4.3.2.4</b>	Μη – Γραμμικά Φαινόμενα σε PCF.....	129
<b>4.3.2.5</b>	Φαινόμενα Πόλωσης σε PCF.....	129
<b>4.3.3</b>	Εφαρμογές Οπτικών Ινών PCF.....	130
<b>4.3.3.1</b>	Μετάδοση Παλμών Υψηλής Ισχύος.....	131
<b>4.3.3.2</b>	Laser Οπτικών Ινών και Ενισχυτές.....	131
<b>4.3.3.3</b>	Δημιουργία Supercontinuum.....	132
<b>4.3.4</b>	Χαρακτηριστικά της PCF του πειράματος.....	134
<b>4.4</b>	Ανάλυση λειτουργίας Συμβολόμετρου Fabry – Péroτ.....	135
<b>4.4.1</b>	Θεωρία Συμβολής H/M Κυμάτων με Διαίρεση Πλάτους.....	136
<b>4.4.2</b>	Δομή Συμβολόμετρου Fabry – Péroτ.....	137
<b>4.4.3</b>	Συνάρτηση Μεταφοράς Συμβολόμετρου Fabry – Péroτ.....	138
<b>4.4.4</b>	Ανάλυση Συμβολόμετρου Fabry – Péroτ στο πεδίο του χρόνου.....	141
<b>4.4.5</b>	Διπλή Διέλευση από Συμβολόμετρο Fabry – Péroτ.....	142
<b>4.4.6</b>	Εφαρμογές Συμβολόμετρου Fabry – Péroτ.....	143

4.4.6.1	Ανάκτηση Ρολογιού.....	143
4.4.6.2	Αύξηση του Ρυθμού Επανάληψης.....	144
4.4.6.3	Επιλογή Καναλιών Πολυκυματικών Πηγών.....	145
4.4.7	Χαρακτηριστικά Συμβολόμετρων Fabry – Pérot του πειράματος.....	145
4.5	Υπολογισμός Συνάρτησης Μεταφοράς της Διάταξης.....	146
4.6	Αναφορές 4 <sup>ο</sup> Κεφαλαίου.....	149

### **Κεφάλαιο 5: Πειραματικά Αποτελέσματα Πολυκυματικής Πηγής**

#### **DWDM**

5.1	Εισαγωγή.....	154
5.2	Αναλυτική Περιγραφή της Πειραματικής Διαδικασίας.....	155
5.3	Προσομοίωση Πολυκυματικής Πηγής.....	156
5.4	Πειραματικά Αποτελέσματα Πολυκυματικής Πηγής.....	160
5.4.1	Φάσματα Εισόδου, Supercontinuum και Εξόδου.....	160
5.4.2	Μετρήσεις Σταθερότητας.....	168
5.4.3	Διαγράμματα Ματιού (Eye Diagrams).....	169
5.4.4	Μετρήσεις BER.....	176

### **Κεφάλαιο 6: Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων και Εφαρμογές της Πολυκυματικής Πηγής**

6.1	Αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.....	194
6.2	Εναλλακτικές εφαρμογές της Πολυκυματικής Πηγής.....	197
6.2.1	Εφαρμογές Μετρολογίας.....	198
6.2.2	Οπτική Τομογραφία Συνοχής Φάσης (Optical Coherence Tomography).....	198
6.2.3	Απεικόνιση με σήματα φάσματος THz.....	201
6.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	203
6.4	Αναφορές 6 <sup>ο</sup> Κεφαλαίου.....	205
<b>Παράρτημα Α</b> .....		207
<b>Παράρτημα Β</b> .....		209

# **Κεφάλαιο 1**

## **Οπτικά Ευρυζωνικά Δίκτυα**

## 1.1 Εισαγωγή

Είναι πλέον αναμφισβήτητο γεγονός ότι η εποχή που διανύουμε χαρακτηρίζεται από μια πληθώρα πηγών πληροφορίας οι οποίες εκμεταλλευόμενες τις ραγδαίες εξελίξεις της τεχνολογίας του 20<sup>ου</sup> αιώνα έγιναν προσιτές σε κάθε σημείο του κόσμου. Η εξέλιξη αυτή είναι αποτέλεσμα μιας εκπληκτικής ανάπτυξης που παρουσίασε ο χώρος των τηλεπικοινωνιών στα τέλη του περασμένου αιώνα. Αποτέλεσμα αυτής της ανάπτυξης είναι το Διαδίκτυο το οποίο είναι αυτό μέσω του οποίου διακινείται αυτός ο τεράστιος όγκος δεδομένων και πάνω στο οποίο σχεδιάστηκαν καινοτόμες εφαρμογές για τη μεταφορά όχι μόνο δεδομένων, όπως ήταν και ο αρχικός προσανατολισμός του, αλλά εικόνας και φωνής επιπλέον. Φυσικό αποτέλεσμα όλων αυτών ήταν να αυξηθεί η κίνηση στο Διαδίκτυο. Σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις ο όγκος της αποθηκευμένης ψηφιακής πληροφορίας παγκοσμίως αυξήθηκε από 3 σε 24 δισεκατομμύρια GB στο χρονικό διάστημα από το 2000 ως το 2003. Όπως διαμορφώθηκε πλέον η νέα αυτή πραγματικότητα τα δίκτυα που ήταν ήδη εγκατεστημένα από προηγούμενες δεκαετίες και υπήρξαν η βάση για τα σταθερά τηλεφωνικά δίκτυα φάνηκαν ανεπαρκή όχι μόνο από πλευράς αρχιτεκτονικών και εκμετάλλευσης του εύρους ζώνης αλλά και όσον αφορά το ίδιο το εύρος ζώνης που αυτά μπορούσαν να υποστηρίξουν. Επιπλέον, εκτός από τις τεχνολογίες χρηστών που εμφανίστηκαν, όπως για παράδειγμα η τεχνολογία *xDSL*, ιδιαίτερη ανάπτυξη είχαμε στους τομείς των εταιρικών ιδιωτικών δικτύων αλλά και των πανεπιστημιακών και ακαδημαϊκών δικτύων (*NRENs*). Πολλά από αυτά μάλιστα δίνουν πρόσβαση σε χρήστες η οποία βασίζεται σε ασύρματη τεχνολογία (*Wi-Fi*) που καθιστά πιο εύκολη την πρόσβαση. Σημαντικός παράγοντας στην έκρηξη των επικοινωνιών υπήρξε και η απελευθέρωση της αγοράς του κλάδου από τις μονοπωλιακές πρακτικές που ίσχυαν παλαιότερα [1]. Οι μελλοντικές εκτιμήσεις ωστόσο ακόμη και για την περίπτωση των οικιακών χρηστών είναι ιδιαίτερα αισιόδοξες αφού οι νέες υπηρεσίες *Triple Play*, που έχουν κάνει την εμφάνισή τους στην

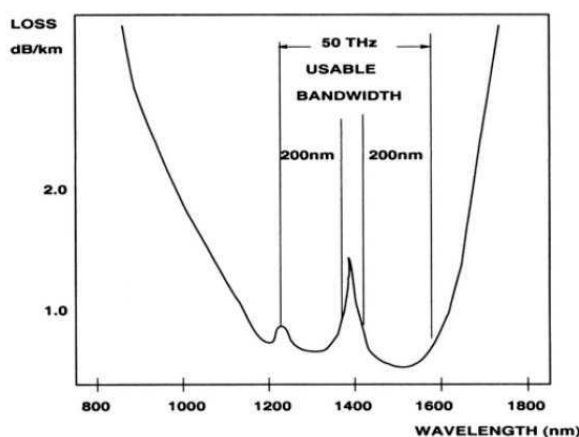


Ευρώπη, και περιλαμβάνουν μετάδοση συνδυασμού δεδομένων, φωνής και βίντεο υψηλής ποιότητας (HDTV) είναι ιδιαίτερα απαιτητικές σε εύρος ζώνης το οποίο στην περίπτωση αυτή είναι της τάξης των δεκάδων ή ακόμα και εκατοντάδων Mbps για να ικανοποιηθούν αυτές οι απαιτήσεις. Μάλιστα σε χώρες όπως η Ιαπωνία η ζήτηση αρχίζει και ξεπερνάει πλέον αυτά τα πρότυπα και οι παρεχόμενες υπηρεσίες εκμεταλλευόμενες τον εγκατεστημένο οπτικό εξοπλισμό σε οικιακούς χρήστες (*Fiber To The Home*) θα μπορέσουν να δώσουν ακόμη μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Επιπλέον σημαντική ζήτηση σε εύρος ζώνης εμφανίζεται σε χρήστες που χρησιμοποιούν κινητά τερματικά. Τα δίκτυα αυτά παρότι ξεκίνησαν σαν δίκτυα που πρόσφεραν υπηρεσίες φωνής και γραπτών μηνυμάτων, όπως είναι το ευρωπαϊκό δίκτυο GSM, σήμερα υπόσχονται ότι θα μπορέσουν να παρέχουν και αυτά υπηρεσίες Triple Play. Η σημαντική μετάβαση στα ασύρματα δίκτυα κινητών χρηστών είναι ότι θα πρέπει να αποκτήσουν ικανότητα μετάδοσης και μεταγωγής πακέτου. Για το λόγο αυτό έχουν εμφανιστεί πολλές ανταγωνιστικές τεχνολογίες όπως είναι τα δίκτυα UMTS που βασίζονται σε κωδικοποίηση CDMA και τα δίκτυα WiMax που βασίζονται σε τεχνικές OFDM. Είναι λοιπόν αντιληπτό ότι τα ασύρματα δίκτυα χρειάζονται και αυτά **Οπτικά Δίκτυα Κορμού** (*Backbone Networks*) για την μεταγωγή αυτού του ολοένα και αυξανόμενου όγκου πληροφορίας.

Για όλους τους παραπάνω λόγους οι επικοινωνίες οπτικών ινών από μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία μετατράπηκε στην κυρίαρχη τεχνολογία στην οποία στηρίζονται οι πάροχοι για να λειτουργήσουν τα δίκτυα κορμού τους. Τα προφανή οφέλη από αυτή τη μετάβαση βασίζονται στα συγκριτικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία οπτικών ινών σε σχέση με τα υπόλοιπα ενσύρματα και ασύρματα μέσα μετάδοσης και μπορούν να συνοψιστούν στα εξής [2]:

- 1) Μεγαλύτερο φασματικό εύρος ζώνης από άλλα μέσα μετάδοσης που είναι της τάξης των 50 THz στην περιοχή των 1.3 και 1.5  $\mu\text{m}$ .

- 2) Ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες που είναι της τάξης των 0.2 dB/km για τις συμβατικές ίνες που χρησιμοποιούνται στην περιοχή των 1.5 μm.
- 3) Εξαιρετική συμπεριφορά σε παρεμβολές και θόρυβο.
- 4) Ευκολία και χαμηλό κόστος κατασκευής.



Διάγραμμα 1.1: Οι περιοχές χαμηλής εξασθένησης της οπτική ίνας [3]

Η εξαιρετική συμπεριφορά των οπτικών ινών τόσο από άποψης εξασθένησης όσο και από ανοχή σε θόρυβο και παρεμβολές επιτρέπουν τεράστιες χωρητικότητες (της τάξης των Tbps με χρήση τεχνικών πολυπλεξίας όπως WDM και OTDM). Αυτό προκύπτει από το θεώρημα του Shannon για τη χωρητικότητα ενός καναλιού που λέει ότι:

$$C = B_T \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.1)$$

Δηλαδή για  $B_T \approx 50$  THz που έχουμε στις οπτικές ίνες και SNR πολύ υψηλό προκύπτει ότι ο θεωρητικά μέγιστος ρυθμός μετάδοσης είναι της τάξης των δεκάδων Tbps. Επιπλέον η χαμηλή εξασθένηση που εμφανίζουν οι οπτικές ίνες καθιστά δυνατή τη μετάδοση σε πολύ μεγάλες αποστάσεις χωρίς αναγέννηση ή απλή ενίσχυση του σήματος.

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η σημασία της οπτικής ίνας σαν μέσο μετάδοσης είναι αρκετό να αναλογιστούμε ότι ακόμη και τα πλέον

γρήγορα ηλεκτρονικά κυκλώματα δεν μπορούν να επεξεργαστούν ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από μερικά Gbps. Επιπλέον, ο ασύρματος δίαυλος παρουσιάζει 20 dB απώλεια σε μερικά μέτρα σε αντίθεση με τις οπτικές ίνες που έχουμε 20 dB απώλειες σε 100 km απόσταση μετάδοσης.

Λόγω των ισχυρών περιορισμών που εισήγαγαν τα διαθέσιμα ηλεκτρονικά συστήματα επεξεργασίας τα πρώτα οπτικά δίκτυα που λειτούργησαν δεν εκμεταλλεύονταν το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης που μπορούσαν να προσφέρουν οι οπτικές ίνες. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα δόθηκε από την δεύτερη γενιά οπτικών δικτύων στην οποία χρησιμοποιήθηκαν νέες τεχνικές για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης και θα σχολιαστούν παρακάτω. Ακόμη, μέχρι την εμφάνιση των Ενισχυτών Ίνας Ερβίου (EDFA) ήταν αναγκαία η αναγέννηση του σήματος αντί για την απλή ενίσχυση του, γεγονός που καθιστούσε τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών ακριβά.

Ωστόσο τα οπτικά συστήματα δεν έχουν μόνο πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα που πολλά από αυτά δεν εμφανίζονται σε τυπικά συστήματα επικοινωνιών [4]. Στα φαινόμενα που εμφανίζονται ανήκουν η *χρωματική διασπορά* που είναι η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος, η *διασπορά κυματοδηγού* που οφείλεται στην ύπαρξη διαφορετικής ταχύτητας διάδοσης για κάθε κυματοδηγούμενο ρυθμό και η *διασπορά δείκτη διάθλασης*. Ακόμη έχουμε φαινόμενα όπως η *αυτοδιαμόρφωση φάσης (SPM)*, η *ετεροδιαμόρφωση φάσης (XPM)*, η *μίξη τεσσάρων φωτονίων (FWM)*, η *εξαναγκασμένη σκέδαση Raman (SRS)* και η *εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin (SBS)*. Τα παραπάνω φαινόμενα αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη ενός φωτονικού δικτύου γιατί επηρεάζουν την ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός φωτονικού δικτύου αφού μπορούν οδηγήσουν σε διασυμβολική παρεμβολή. Παρ' όλα αυτά, τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται με ειδικές τεχνικές και περιορισμό της ισχύος και έτσι τα φωτονικά δίκτυα χαρακτηρίζονται ως εξαιρετικά αξιόπιστα κατά τη μετάδοση αφού σε εμπορικά διαθέσιμα συστήματα συναντούμε ρυθμούς σφαλμάτων (BER) της τάξης των  $10^{-15}$  μειώνοντας

έτσι την πολυπλοκότητα που εισάγουν περίπλοκες μέθοδοι κωδικοποίησης και διαμόρφωσης.

## **1.2 Δίκτυα Οπτικών Ινών**

Τα δίκτυα οπτικών ινών με την εμφάνισή τους δεν έκαναν άμεσα αισθητή διαφορά στο τηλεπικοινωνιακό τοπίο αλλά χρειάστηκαν να αναπτυχθούν διάφορες τεχνικές για την εξέλιξή τους και την ολοένα και περισσότερο καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους. Μερικές από τις εξελίξεις που κατέστησαν αντιληπτό ότι είναι δυνατό εκτός από τη μετάδοση, που ήταν ήδη γνωστό, να γίνει και η μεταγωγή στο οπτικό επίπεδο ήταν οι **Οπτικοί Ενισχυτές Ίνας Ερβίου (EDFA)** και τα **Οπτικά Στοιχεία Διασύνδεσης (OXC)** με αποτέλεσμα την τεχνολογία **Πολυπλεξίας Διαιρέσης Μήκους Κύματος (WDM)** στην οποία στηρίζεται και η δεύτερη γενιά των οπτικών δικτύων. Ωστόσο η αρχιτεκτονική αυτή που περιγράφεται παρακάτω αντιμετωπίζει αρκετά προβλήματα όσον αφορά την αποδοτική εκμετάλλευση του παρεχόμενου από τη φυσική τοπολογία εύρους ζώνης του δικτύου. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάγκη υιοθέτησης μιας διαφορετικής αρχιτεκτονικής η οποία μοιάζει πολύ με την σημερινή αρχιτεκτονική των ηλεκτρονικών δικτύων και ακολουθεί τις βασικές αρχές της.

### **1.2.1 Οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς**

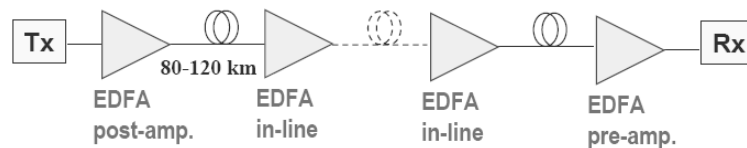
Στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης των οπτικών δικτύων η οπτική ίνα χρησιμοποιήθηκε απλά σαν μέσο μετάδοσης ενώ όλος ο υπόλοιπος εξοπλισμός ήταν ηλεκτρονικός. Η υιοθέτηση αυτής της αρχιτεκτονικής εκμεταλλεύεται την οπτική ίνα ως ένα ιδιαίτερα αξιόπιστο μέσο μετάδοσης για μεγάλες αποστάσεις αλλά λόγω του ότι χρησιμοποιεί οπτοηλεκτρονική μετατροπή (O/E/O conversion) για 3R (Αναδιαμόρφωση (**R**eshape), Επανασυγχρονισμός (**R**etime), Επανενίσχυση (**R**eamplify)) αναγέννηση του σήματος σε ενδιάμεσες

και σχετικά μικρές αποστάσεις αυξάνει δραματικά το κόστος. Η αρχιτεκτονική αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.1: Η δομή ενός συστήματος 3R [5]

Έτσι λοιπόν προέκυψε η ανάγκη για επεξεργασία του σήματος σε αμιγώς οπτικό επίπεδο. Η ανάπτυξη του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου (**Erbium Doped Fiber Amplifier**) έφερε επανάσταση στην μετάδοση με οπτικές ίνες. Με τη βοήθεια των ενισχυτών αυτών αυξάνεται η απόσταση επανενίσχυσης του σήματος ενώ η υιοθέτηση αυτής της προσέγγισης δεν απαιτεί αναδιαμόρφωση (**Reshape**) και επανασυγχρονισμό (**Retime**) των οπτικών παλμών αφού δεν εμπλέκεται ηλεκτρονικό τμήμα στην μετάδοση και άρα δεν έχουμε εισαγωγή στο σήμα επιδράσεων μη γραμμικής διάδοσης που επιφέρει η προηγούμενη προσέγγιση. Επιπλέον ειδικά σε WDM συστήματα ο μη διαχωρισμός στα επιμέρους μήκη κύματος είχε σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους σε συστήματα μεγάλης κλίμακας αφού οι EDFA συμπεριφέρονται σε όλα τα μήκη κύματος το ίδιο και είναι αποτέλεσμα του τεράστιου εύρους ζώνης που παρέχουν. Η αρχιτεκτονική αυτή φαίνεται παρακάτω:



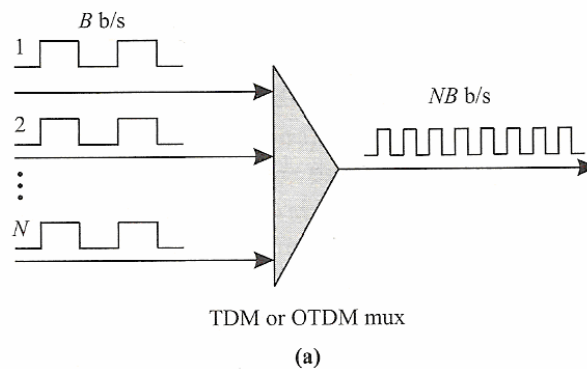
Σχήμα 1.2: Η δομή ενός συστήματος με ενίσχυση [5]

Ωστόσο τα πρώτα συστήματα αυτά υλοποιούσαν τις λειτουργίες της μεταγωγής (switching) σε ηλεκτρονικό επίπεδο με αποτέλεσμα όλα τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα των παραπάνω πρώτης γενιάς οπτικών δικτύων είναι τα πρότυπα SDH (Synchronous Digital Hierarchy) και

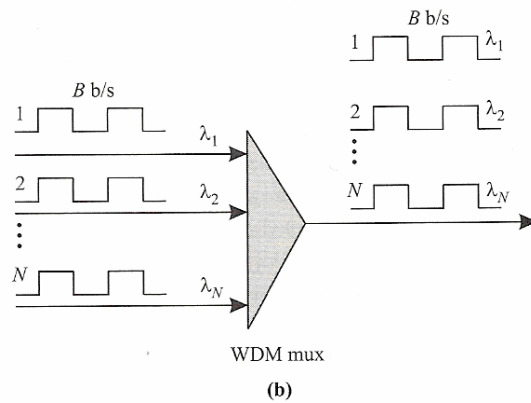
SONET (Synchronous Optical NETwork) που χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον και εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα.

### 1.2.2 Οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς

Την υιοθέτηση των οπτικών δικτύων ως δικτύων κορμού για μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις ακολούθησε η μεταφορά κάποιων λειτουργιών από το ηλεκτρονικό τμήμα στο οπτικό τμήμα του δικτύου όπως για παράδειγμα η μεταγωγή (switching)/δρομολόγηση (routing) ή τουλάχιστον κάποιες λειτουργίες τους. Με την ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για εύρος ζώνης τα υπάρχοντα δίκτυα έπρεπε να αναβαθμιστούν σε επίπεδα υψηλότερα από εκείνα που μπορούσαν να προσφέρουν οι ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες. Η επιπλέον ταχύτητα που προσφέρει η αμιγώς οπτική λογική (all-optical) σε συνδυασμό με τεχνικές πολυπλεξίας όπως οι WDM (Wavelength Division Multiplexing) και OTDM (Optical Time Division Multiplexing) μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της δεύτερης γενιάς οπτικών δικτύων<sup>1</sup> [6]:

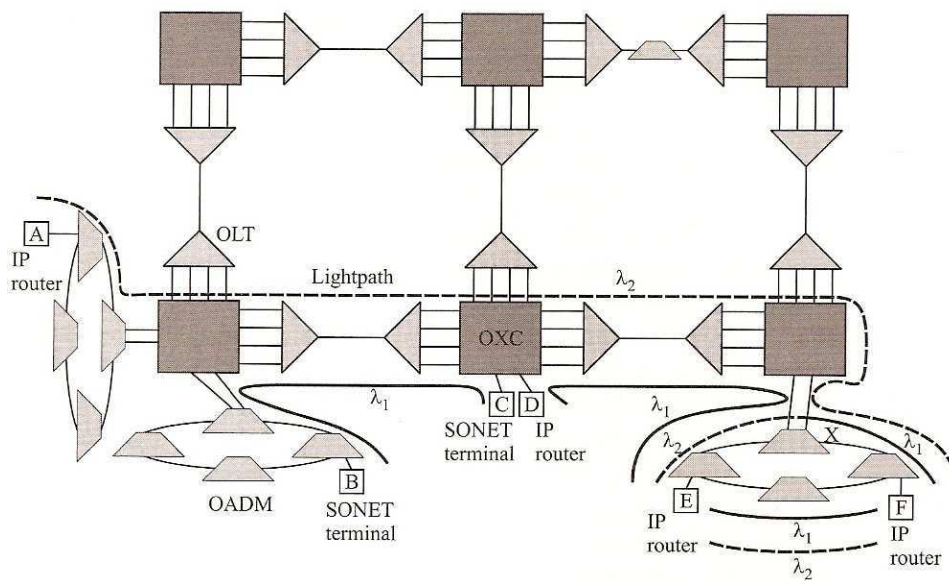


<sup>1</sup> Στα οπτικά δίκτυα έχουν προταθεί και άλλες μέθοδοι πολυπλεξίας όπως οι CDM (Code Division Multiplexing) και SCM (SubCarrier Multiplexing). Ιδιαίτερα η δεύτερη έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά σε διάφορες εφαρμογές όπως για μεταφορά εικόνας υψηλής ευκρίνειας.



Σχήμα 1.3: Τεχνικές πολυπλεξίας για αύξηση της χωρητικότητας μετάδοσης  
(a) OTDM (b) WDM [1]

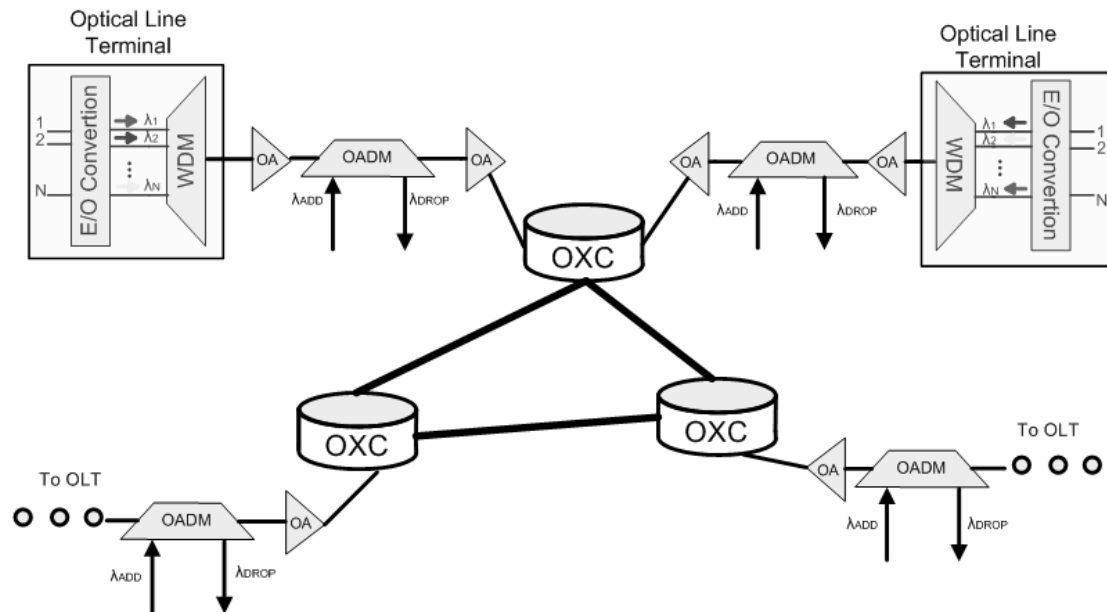
Η γενική αρχιτεκτονική των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς αποτελείται από ορισμένα βασικά δομικά συστήματα και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [1]:



Σχήμα 1.4: Αρχιτεκτονική δικτύου WDM δρομολόγησης μήκους κύματος. Οι χρήστες του δικτύου μπορούν να είναι IP routers ή τερματικά SONET. [1]

Τα παραπάνω δίκτυα έχουν υιοθετήσει την τεχνική πολυπλεξίας WDM ενώ η τεχνική OTDM αναμένεται να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικά δίκτυα αφού χρειάζεται 3R αναγέννηση του σήματος. Βασικά δομικά

χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών είναι τα οπτικά τερματικά γραμμής (OLT), οι οπτικοί πολυπλέκτες προσθήκης/αφαίρεσης (OADM) και τα οπτικά στοιχεία διασύνδεσης (OXC) ενώ απαραίτητοι είναι και οι EDFA για την περιοδική ενίσχυση των σημάτων.



Σχήμα 1.5: Αρχιτεκτονική Δικτύου DWDM

Ένα OLT χρησιμοποιείται για να πολυπλέξει διάφορα μήκη κύματος σε μία οπτική ίνα και να αποπολυπλέξει τα διάφορα μήκη κύματος από μια ίνα σε επιμέρους ίνες. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα τα OLTs χρησιμοποιούνται στα άκρα μιας από σημείο σε σημείο σύνδεσης εκεί όπου μπορεί να τερματίζεται το οπτικό μέρος του δικτύου με αποτέλεσμα να εκτελούν και O/E μετατροπή. Ένας OADM επιλεκτικά μπορεί να αφαιρεί κάποια από τα κανάλια που καταλήγουν σε αυτόν ή/και να προσθέτει κάποια άλλα σε μια ζεύξη. Αντίστοιχη είναι και η λειτουργία των OXCs αλλά η διαφορά τους είναι ότι λειτουργούν σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα αφού μπορούν να χειρίζονται αρκετά περισσότερα κανάλια.

Έτσι βλέπουμε πως αυτή η αρχιτεκτονική έχει μια ιεραρχική δομή που ξεκινά από τα OLTs που είναι παρόντα στα σημεία εισόδου και εξόδου του δικτύου και επιτελούν τις διασυνδέσεις με άλλα δίκτυα.



Στη συνέχεια οι OADMs συγκεντρώνουν την κίνηση από και προς διάφορα OLTs απορρίπτοντας ή προσθέτοντας τα αντίστοιχα κανάλια και διασυνδέονται με τα OXCs τα οποία είναι υπεύθυνα για την κίνηση στο δίκτυο σε μακροσκοπική κλίμακα. Για την υλοποίηση τους έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούν 2x2 διακόπτες μεταγωγής υλοποιημένους με οπτικούς ενισχυτές ημιαγωγού (SOA), συμβολόμετρα Mach-Zender (MZI), δρομολογητές σχάρας κυματοδηγού (WGR), οπτικές διατάξεις στερεάς κατάστασης όπως ηλεκτροοπτικούς και ακουστοοπτικούς διαμορφωτές και μικρο-ηλεκτρομηχανικές διατάξεις (MEMS) που χρησιμοποιούν καθρέπτες (mirror based).

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική έχει ορισμένα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά που την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική [1]:

- **Επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος (wavelength reuse):**

Στα δίκτυα αυτής της αρχιτεκτονικής πολλές διαδρομές μήκους κύματος χρησιμοποιούν το ίδιο μήκος κύματος για τη ζεύξη αρκεί να μην υπάρχει σύγκρουση κάπου μέσα στην διαδρομή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα με μερικά περιορισμένα μήκη κύματος να έχουμε πολλές συνδέσεις.

- **Μετατροπή μήκους κύματος (wavelength conversion):**

Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την απευθείας στο οπτικό επίπεδο μετατροπή μιας ροής δεδομένων που χρησιμοποιεί για τη μετάδοση της έστω ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος  $\lambda_1$  σε ένα άλλο μήκος κύματος  $\lambda_2$ .

- **Διαφάνεια (Transparency):**

Η έννοια της διαφάνειας των οπτικών δικτύων είναι εξαιρετικά σημαντική και βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε μήκος κύματος που

αποτελεί και ένα ξεχωριστό κανάλι μπορεί να μεταφέρει διαφορετικό ρυθμό δεδομένων χρησιμοποιώντας διαφορετικό πρωτόκολλο. Αυτή είναι μια σπουδαία καινοτομία των οπτικών δικτύων αφού η δρομολόγηση γίνεται στο οπτικό (φυσικό) επίπεδο του δικτύου και επιπλέον δεν απαιτεί συγχρονισμό. Έτσι στα άκρα του δικτύου μπορούμε να έχουμε δρομολογητές IP αλλά και τερματικά SONET.

- **Μεταγωγή κυκλώματος (Circuit switching):**

Οι συνδέσεις σε αυτού του τύπου τα δίκτυα παραμένουν σταθερές αφού εδραιωθούν. Έτσι μπορεί μια σύνδεση να είναι ανοιχτή για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στα μελλοντικά δίκτυα θα δούμε αυτή τη διαδικασία να είναι περισσότερο δυναμική. Επιπλέον η μεταγωγή πακέτου σε οπτικό επίπεδο είναι ακόμη σε στάδιο εξέλιξης και όπου αυτή απαιτείται γίνεται από υψηλότερα στρώματα του δικτύου (ATM και IP).

- **Ανθεκτικότητα (Survivability)**

Τα δίκτυα αυτά έχουν την δυνατότητα σε περιπτώσεις σφάλματος να επαναδρομολογούν τα δεδομένα από εναλλακτικές διαδρομές. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό που προσδίδει αξιοπιστία στο δίκτυο.

- **Τοπολογία οπτικών διαδρομών (Lightpath topology)**

Η τοπολογία αυτή είναι αυτή που φαίνεται από τα υψηλότερα στρώματα του δικτύου και λειτουργεί ως λογική σύνδεση μεταξύ δρομολογητών IP σε ένα δίκτυο IP.

Σε πλήρη αντιστοιχία με την υιοθέτηση της πολυπλεξίας μήκους κύματος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και πολυπλεξία διαίρεσης

χρόνου (OTDM). Οι απαιτήσεις ωστόσο σε εξοπλισμό είναι διαφορετικές αφού απαιτείται η προσθήκη και αφαίρεση bits αλλά και η 3R οπτική αναγέννηση του σήματος με τη βασική προϋπόθεση ότι μπορεί να επιτευχθεί η ανάκτηση του σήματος ρολογιού στο βασικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων [7].

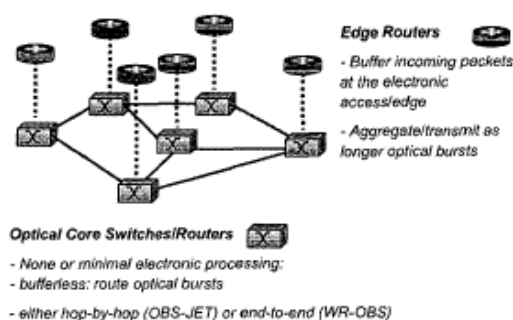
Αν εξετάσουμε όλα τα χαρακτηριστικά των δικτύων δεύτερης γενιάς μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μπορούν να διαχειριστούν συγκεντρωτικά ένα πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων που διέρχεται από αυτά και την απευθείας δρομολόγηση των δεδομένων αυτών στο οπτικό επίπεδο. Ωστόσο τα δίκτυα αυτά δεν μπορούν χειριστούν αποδοτικά δεδομένα μικρού όγκου και εκρηκτικής ροής αφού η απόδοση του εύρους ζώνης σε κάθε σύνδεση είναι στατική και επιτελούν μεταγωγή κυκλώματος. Για τους λόγους αυτούς και για το γεγονός ότι υπάρχει απαίτηση για δίκτυα που να μπορούν να εκμεταλλεύονται το διαθέσιμο εύρος ζώνης κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο οδηγηθήκαμε στην τρίτη γενιά οπτικών δικτύων που ωστόσο δεν έχει γίνει εμπορική τεχνολογία ακόμη.

### 1.2.3 Οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς

Στα οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς γίνεται ερευνητικά μεγάλη προσπάθεια για να αποκτήσουν αυτά τα δίκτυα κάποια επιθυμητά χαρακτηριστικά που δεν υποστήριζαν οι προηγούμενες γενιές όπως η βέλτιστη εκμετάλλευση του παρεχόμενου εύρους ζώνης, η αποδοτική διαχείριση της κίνησης εκρηκτικής ροής και ο καλύτερος δυνατός χειρισμός πακέτων μικρού μεγέθους. Οι τεχνικές και οι βασικές αρχές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεν διαφέρουν από την πραγματικότητα των δικτύων που βασίζονται σε ηλεκτρονική επεξεργασία της μεταδιδόμενης πληροφορίας. Οι κύριες τεχνικές αυτές είναι η **Οπτική Μεταγωγή Εκρηκτικής Ροής (Optical Burst Switching)**, η **Οπτική Μεταγωγή Πακέτου (Optical Packet Switching)** και μια παραλλαγή αυτής που είναι η **Οπτική Μεταγωγή Επικεφαλίδας (Optical Label Swapping)**. Οι τεχνικές αυτές εξετάζονται παρακάτω [8],[9]:

### 1.2.3.1 Οπτική Μεταγωγή Εκρηκτικής ροής (OBS)

Η οπτική μεταγωγή εκρηκτικής ροής πληροφορίας αποτελεί μια παραλλαγή της οπτικής μεταγωγής πακέτου με ορισμένες βασικές διαφοροποιήσεις. Η βασική αρχή της τεχνικής αυτής είναι η συγκέντρωση στους κόμβους που βρίσκονται στα άκρα του αμιγώς οπτικού δικτύου των πακέτων που ακολουθούν την ίδια διαδρομή μέσα στο δίκτυο σε μια **ριπή (burst)**, η προσθήκη επικεφαλίδας σε αυτή και η μετάδοση στο δίκτυο της πληροφορίας με εκρηκτικό τρόπο. Ωστόσο θα πρέπει να έχει προηγηθεί η δέσμευση εύρους ζώνης από το δίκτυο ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση δύο διαφορετικών πακέτων μέσα σε αυτό αφού η αρχιτεκτονική αυτή δεν χρησιμοποιεί χώρο αποθήκευσης (RAM, buffers, κτλ.) στους ενδιάμεσους κόμβους χάριν απλότητας του δικτύου, μείωσης του κόστους και βελτίωσης της επίδοσης κατά τη μετάδοση. Μια σημαντική διαφορά που παρατηρείται σε σχέση με τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου είναι το γεγονός ότι το μέγεθος του πακέτου – ριπής είναι γενικά μεγαλύτερο από από ότι σε αυτά και είναι μεταβλητού και σίγουρα όχι προκαθορισμένου μεγέθους. Ένα σχετικά απλό σχήμα που προτείνεται χρησιμοποιεί δύο διαφορετικά κανάλια για την επικεφαλίδα (header) και την πληροφορία (payload) κάθε ριπής [10].



Σχήμα 1.6: Σχηματική αναπαράσταση δικτύου μεταγωγής εκρηκτικής ροής [10]

Η επικεφαλίδα στέλνεται πριν τα δεδομένα, που έρχονται με μια καθυστέρηση, στον προορισμό έτσι ώστε μέσα σε αυτό το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα να είναι δυνατή η επεξεργασία της επικεφαλίδας και η δέσμευση εύρους ζώνης για τη μετάδοση της πληροφορίας που θα ακολουθήσει [11]. Ο όρος που έχει επικρατήσει

για αυτή την αρχιτεκτονική είναι “*Just-Enough-Time*” (*JET*). Σε μια άλλη υλοποίηση επιχειρείται η απόδοση Ποιότητας Υπηρεσίας (Quality of Service) στο δίκτυο χρησιμοποιώντας γραμμές καθυστέρησης οπτικής ίνας (Fiber Delay Lines) [12]. Ακόμη και σε αυτή την υλοποίηση δεν είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν στοιχεία μνήμης.

### 1.2.3.2 Οπτική Μεταγωγή Πακέτου (OPS)

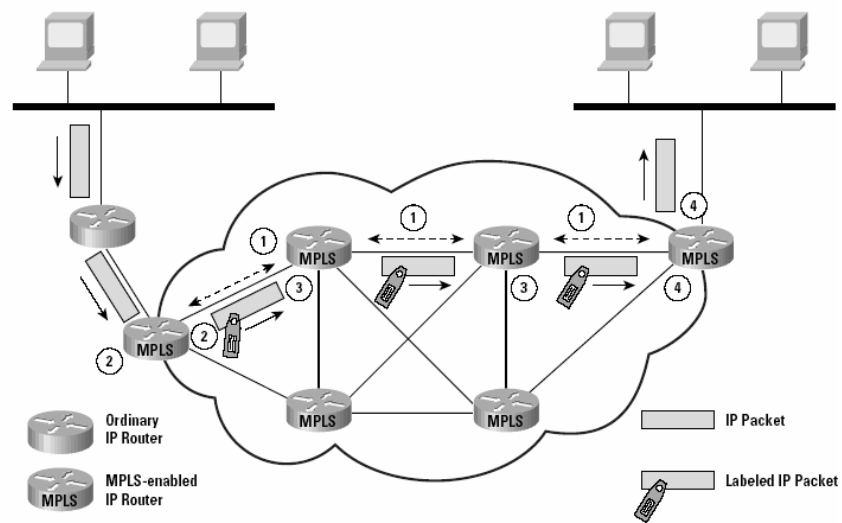
Στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου η πληροφορία μεταδίδεται σε ανεξάρτητα πακέτα χωρίς να χρειάζεται η συγκέντρωση σε μεγαλύτερου μήκους τμήματα πληροφορίας όπως προηγουμένως. Έτσι κάθε πακέτο αποτελείται από την *επικεφαλίδα (header)* και το *φορτίο (payload)* της πληροφορίας. Σε αυτό τον τύπο δικτύων η μεταγωγή – δρομολόγηση είναι δυνατόν να επιτελούνται απευθείας στο οπτικό επίπεδο ενώ κάθε κόμβος επεξεργάζεται το κάθε πακέτο ξεχωριστά. Έτσι λοιπόν τα δίκτυα αυτά δεν διαφέρουν σε τίποτα από τα κλασικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου εκμεταλλευόμενα ωστόσο τις τεράστιες ταχύτητες που τους δίνει η οπτική τεχνολογία. Το σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η διαχείριση του εύρους ζώνης κατά βέλτιστο τρόπο προσφέροντάς το κατά ζήτηση (on demand). Επιπλέον αυτός ο τύπος δικτύων μπορεί να προσφέρει διάφορους τύπους υπηρεσίας στα ανώτερα στρώματα και για το λόγο αυτό αποκτά *διαφάνεια (transparency)* ως προς το ρυθμό μετάδοσης και το πρωτόκολλο. Επιπλέον, μπορεί να υποστηριχθεί είτε κίνηση προσανατολισμένη σε σύνδεση (connection - oriented) TCP, είτε χωρίς σύνδεση (connectionless) UDP [13], [14],[15]. Παρόλα αυτά, στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου υπάρχουν δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπίζονται όπως [9]:

1. Υπερβολικά μεγάλο μέγεθος πινάκων δρομολόγησης με αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας της δρομολόγησης.
2. Η μη αποδοτική εξεύρεση λύσης για αποθήκευση των πακέτων ώστε να αποφεύγονται συγκρούσεις.

Ωστόσο ως τώρα δεν υπάρχει κάποια αξιολογή πρόταση για αμιγώς οπτική αποθήκευση δεδομένων και για το λόγο αυτό η οπτική μεταγωγή πακέτου δεν έχει αποδειχθεί αποτελεσματική. Μια εναλλακτική λύση σε αυτό σίγουρα αποτελεί η μεταγωγή εκρηκτικής ροής αλλά και η τεχνική της μεταγωγής ετικέτας η οποία λύνει μερικώς το πρόβλημα αυτό αφού απλοποιεί και μειώνει την πολυπλοκότητα της δρομολόγησης.

### **1.2.3.3 Οπτική Μεταγωγή Ετικέτας (OLS)**

Στα δίκτυα μεταγωγής πακέτου η επικεφαλίδα που προστίθεται σε κάθε πακέτο έχει καθολική σημασία μέσα στο δίκτυο, δηλαδή περιέχει μια καθολικής σημασίας διεύθυνση αποστολής και μια προορισμού. Αυτό αναγκάζει κάθε κόμβο του δικτύου να είναι αναγκασμένος να γνωρίζει που αντιστοιχεί κάθε διεύθυνση μέσα στο δίκτυο και σύμφωνα με τον αλγόριθμο δρομολόγησης που ακολουθείται να καθορίζεται ο επόμενος κόμβος (next hop) που θα δρομολογηθεί το κάθε πακέτο. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης χωρίζονται σε αυτά που επιτελούν δρομολόγηση μέσα στο ίδιο **Αυτόνομο Σύστημα (Autonomous System)** όπως είναι τα **OSPF (Open Shortest Path First)** [16], **RIP (Routing Information Protocol)** [17] και σε αυτά που επιτελούν δρομολόγηση μεταξύ Αυτόνομων Συστημάτων όπως το **BGP (Border Gateway Protocol)** [18]. Αυτή είναι η πραγματικότητα που εφαρμόζεται σήμερα στα δίκτυα δρομολόγησης IP [19],[20]. Ωστόσο η λογική αυτή αναγκάζει τους δρομολογητές να συντηρούν ένα μεγάλο όγκο πληροφορίας για να δρομολογούν τα εισερχόμενα πακέτα σύμφωνα με τον πίνακα δρομολόγησης. Μια αρχιτεκτονική που έχει προταθεί και εφαρμοστεί σε υπάρχοντα ηλεκτρονικά δίκτυα και αναμένεται ότι οι βασικές αρχές του θα επικρατήσουν και στα αμιγώς οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου είναι το πρωτόκολλο **MPLS (Multi – Protocol Label Switching)** [21].

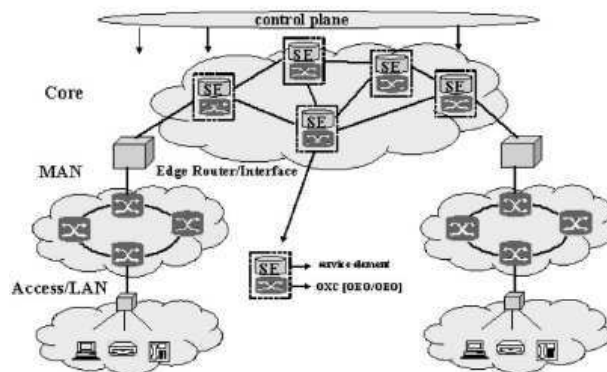


Σχήμα 1.7: Σχηματική αναπαράσταση δικτύου μεταγωγής ετικέτας MPLS

Ένα πρωτόκολλο αντίστοιχο με το MPLS που έχει προταθεί και αναμένεται να επικρατήσει είναι το **AOLS (All-Optical Label Swapping)** [22]. Το πρωτόκολλο αυτό ουσιαστικά υλοποιεί τις λειτουργίες του MPLS σε αμιγώς οπτικό επίπεδο. Η βασική αρχή αυτής της τεχνικής μεταγωγής είναι ότι κατά την είσοδο ενός πακέτου μέσα στο αμιγώς οπτικό δίκτυο ανατίθεται σε αυτό μια επικεφαλίδα (label) η οποία καθορίζεται από την διαδρομή του πακέτου μέσα στο δίκτυο και μπορεί να έχει είτε τοπική είτε καθολική σημασία. Αυτό σημαίνει ότι στο πακέτο μπορεί είτε να ανατίθεται μια επικεφαλίδα κατά την είσοδο στο δίκτυο, είτε αυτή η επικεφαλίδα να αλλάζει σε κάθε διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων. Αυτό που δίνει στη μεταγωγή επικεφαλίδας συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων τεχνικών είναι το γεγονός ότι απλουστεύεται η πληροφορία δρομολόγησης που πρέπει να διατηρεί ο κάθε ενδιάμεσος κόμβος στο δίκτυο (πίνακες δρομολόγησης) σε σημαντικό βαθμό αφού το ζεύγος Διεύθυνση Αποστολέα – Διεύθυνση Προορισμού αντιστοιχίζεται σε μια επικεφαλίδα που καθορίζει αυτή τη διαδρομή.

### 1.3 Τα Οπτικά Δίκτυα του μέλλοντος

Οι πρώτες προοπτικές των αμιγώς οπτικών δικτύων έβλεπαν την χρήση των οπτικών στοιχείων διασύνδεσης (OXCs) σαν διατάξεις που απλά θα είχαν την ικανότητα να ενώσουν τους ήδη υπάρχοντες κόμβους δικτύων SDH/SONET και IP διαμορφώνοντας έτσι το οπτικό επίπεδο το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση μέσα σε αυτό. Με την πάροδο του χρόνου όμως και λόγω της ολοένα και αυξανόμενης ζήτησης για περισσότερο εύρος ζώνης διαμορφώθηκε ένα διαφορετικό μοντέλο αμιγώς οπτικού δικτύου. Στο δίκτυο κορμού πλέον οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με οπτικές γραμμές με περιοδική ενίσχυση του σήματος (ίσως και αναγέννηση). Τα οπτικά στοιχεία διασύνδεσης έχουν την ικανότητα να προσθέτουν και να αφαιρούν μήκη κύματος από και προς τα στοιχεία υπηρεσίας (Service Elements) τα οποία μπορούν να είναι μεταγωγείς – δρομολογητές IP/MPLS, SDH/SONET DXCs ή οπτικός μεταγωγέας πακέτου/ριπής.



Σχήμα 1.8: Σχηματική απεικόνιση του μελλοντικού οπτικού δικτύου. [8]

Στο άκρο του δικτύου η κίνηση μορφοποιείται στις αντίστοιχες δικτυακές υπηρεσίες μέσω δρομολογητών που μπορεί να υποστηρίζουν διεπαφές είτε δικτύου προς χρήστη (UNI) είτε δικτύου προς δίκτυο (NNI).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των μελλοντικών οπτικών δικτύων είναι το γεγονός ότι θα έχουν την ικανότητα να λειτουργούν σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Τα υπάρχοντα συστήματα σήμερα που είναι σε λειτουργία υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 10

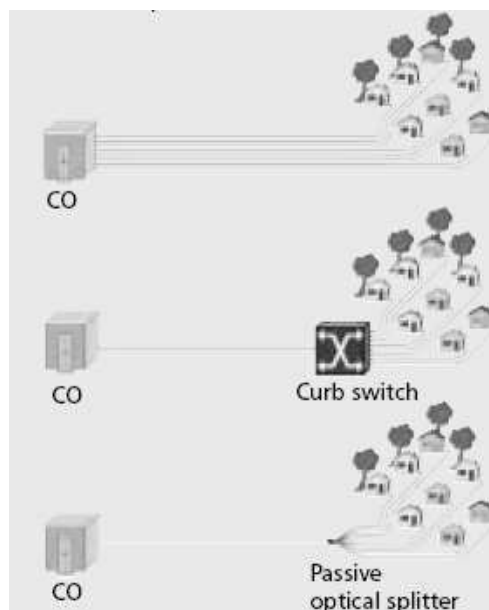


Gbps ενώ σύντομα θα είναι εμπορικά διαθέσιμα και συστήματα με ρυθμούς μετάδοσης 40 Gbps και ίσως στο μέλλον να δούμε και συστήματα στα 160 Gbps. Το βασικό πλεονέκτημα για τη μετάβαση σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης είναι ότι τα συστήματα απαιτούν μικρότερου μεγέθους κλιμάκωση, που αυξάνει σημαντικά το κόστος, αφού πολλές από τις λειτουργίες του φυσικού στρώματος, εκτός της ενίσχυσης κατά τη μετάδοση, λειτουργούν για ένα μήκος κύματος. Σε αντίθεση με τα παραπάνω έρχονται τα όσα μειονεκτήματα εμφανίζονται και αφορούν αυξημένες απαιτήσεις διαχείρισης και εξάλειψης φαινομένων διασποράς και άλλων μη γραμμικών φαινομένων. Για το λόγο αυτό εξετάζονται διάφορες μέθοδοι κωδικοποίησης, όπως για παράδειγμα DPSK, που μέχρι τώρα δεν υπήρχε ανάγκη να εφαρμοστούν.

Όσον αφορά τη μεταγωγή της πληροφορίας μέσα στο δίκτυο, σε οποιαδήποτε μορφή και αν είναι αυτή (συνεχής ροή με δεσμευμένο κύκλωμα, πακέτα, ριπές), σε πρώτη φάση αυτό που εφαρμόζεται είναι η αυτόματη μεταγωγή κυκλώματος, όπως περιγράφηκε και προηγουμένως. Σε αυτή την προοπτική τα υπάρχοντα δίκτυα SDH/SONET συνυπάρχουν και αποτελούν το βασικό δομικό στοιχείο του δικτύου πρόσβασης. Σε δεύτερη φάση προβλέπεται να εφαρμοστεί η οπτική μεταγωγή εκρηκτικής ροής – ριπής προσανατολισμένη περισσότερο στις ανάγκες του χρήστη με την εφαρμογή ενός **γενικευμένου πρωτοκόλλου μεταγωγής ετικέτας (GMPLS)**. Σημαντική εξέλιξη σε αυτή την τεχνολογία θα είναι η ευελιξία στην υποστήριξη μικρών πακέτων δεδομένων (granularities). Το τελικό στάδιο, το οποίο είναι και το πλέον δύσκολο και χρονικά τελευταίο, είναι η οπτική μεταγωγή πακέτου η οποία βελτιστοποιεί τη χρήση των πόρων του δικτύου όντας η βέλτιστη τεχνική μεταγωγής.

Σημαντική εξέλιξη στο μέλλον των οπτικών δικτύων θα είναι και η μετάβαση από την υπάρχουσα υποδομή σε υποδομές που επιβάλλουν τεχνολογίες του τύπου FTTx. Αυτού του τύπου οι τεχνολογίες υποστηρίζουν τη ιδέα του **Παθητικού Οπτικού Δικτύου (Passive Optical Network)** που έχει μελετηθεί εκτενώς [23] – [25]. Τα PONs βασίζονται σε διατάξεις όπως ο συζεύκτης παθητικού αστέρα (passive

star coupler) και έχουν την ικανότητα να προσφέρουν κάθε τύπου υπηρεσία (voice, data, video) ενώ μπορούν και να υποστηρίξουν διάφορα πρωτόκολλα.



Σχήμα 1.9: Τοπολογίες Πιθανών Σεναρίων FTTH [23]

Τα δίκτυα αυτά μπορούν είτε να αφορούν τοπικά δίκτυα (LANs) είτε οικιακούς χρήστες. Διάφορες τεχνικές και λύσεις έχουν προταθεί που αφορούν κυρίως πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM) [26], αλλά και περισσότερο παραδοσιακών λύσεων (ATM/TDM) στα πρότυπα του ISDN. Το προφανές πλεονέκτημα των τεχνικών αυτών είναι η άρση των περιορισμών σε ρυθμό μετάδοσης (last mile problem) των οικιακών χρηστών που σήμερα, στις περισσότερες περιπτώσεις, βασίζεται στον εξοπλισμό του σταθερού τηλεφωνικού δικτύου (χάλκινα καλώδια). Εναλλακτικές τεχνικές που έχουν προταθεί υιοθετούν ασύρματη πρόσβαση στο δίκτυο υπηρεσιών με όποια επακόλουθα συνεπάγονται από αυτή την τεχνολογία.

Όλες οι παραπάνω καινοτομίες που θα εφαρμοστούν στο μέλλον θα αλλάξουν την επικρατούσα κατάσταση στα δίκτυα των παρόχων και θα μπορέσουν να προσφέρουν καινοτόμες υπηρεσίες που φαίνεται πως έχουν ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση. Η ουσιαστική αύξηση του παρεχόμενου εύρους ζώνης είναι επιτακτική ανάγκη για την επιτυχή εφαρμογή των ιδιαίτερα απαιτητικών υπηρεσιών αυτών.

## **1.4 Αναφορές 1<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**

- [1] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, “*Optical networks: A practical perspective*”, Academic Press Inc., NY, 2nd Ed., 2002
- [2] G. P. Agrawal, “*Fiber-Optic Communication Systems*”, 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley & Sons Inc., NY, 2002
- [3] K. M. Sivalingam and S. Subramaniam, “*Optical WDM Networks Principles and Practice*”, Kluwer Academic Publishers, NY, 2000
- [4] G. P. Agrawal, “*Nonlinear Fiber Optics*”, 3rd Ed., Academic Press Inc., CA, 2001
- [5] Η. Αβραμόπουλος, Σημειώσεις του μαθήματος «*Συστήματα Μετάδοσης και Δίκτυα Οπτικών Ινών*»
- [6] M. J. O’ Mahony, “*Optical multiplexing in fiber networks: Progress in WDM and OTDM*”, IEEE Communications Magazine, vol. 33, No. 12, pp. 82-88, Dec. 1995.
- [7] B. Sartorius, “*3R regeneration for all-optical networks*”, 3rd International Conference on Transparent Optical Networks, Krakow, Poland, pp. 33-37, 2001.
- [8] M. J. O’ Mahony et al., “*Future Optical Networks*”, IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 24, No. 12, pp. 4684-4696, Dec. 2006
- [9] Ν. Πλέρος, «*Ψηφιακά Συστήματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων*», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.
- [10] P. Bayvel, “*Wavelength routing and optical burst switching in the design of future optical network architectures*”, 27th European Conference in Optical Communications (ECOC) 2001, Amsterdam, The Netherlands, pp. 616-619, Th.L.2.5.

- [11] M. Yoo and C. Qiao, “*A novel switching paradigm for buffer-less WDM networks*”, Optical Fiber Communication Conference, 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication. OFC/IOOC '99, Vol. 3, pp. 177-179, Feb. 1999
- [12] M. Yoo et al., “*QoS Performance of Optical Burst Switching in IP- Over-WDM Networks*”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 18, No. 10, pp. 2062-2071, Oct 2000
- [13] M. J. O’ Mahony et al., “*The Application of Optical Packet Switching in Future Communication Networks*”, IEEE Communications Magazine Vol. 39, No. 3, pp. 128-135, Mar 2001
- [14] D. Hunter and I. Andonovic, “*Approaches to Optical Internet Packet Switching*”, IEEE Communications Magazine Vol. 38, No. 9, pp. 116-122, Sep. 2000
- [15] S. Yao et al., “*All-optical packet switching for Metropolitan Area Networks: Opportunities and Challenges*”, IEEE Communications Magazine, Vol. 39, No. 3, pp. 142-148, Mar. 2001
- [16] J. Moy, “*OSPF Version 2*”, RFC 2328, Apr. 1998. <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2328.txt>
- [17] G. Malkin, “*RIP Version 2*”, RFC 2453, Nov. 1998. <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2453.txt>
- [18] Y. Rekhter and T. Li, “*A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)*”, RFC 1771, Mar. 1995 <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1771.txt>
- [19] J. Kurose and K. Ross, “*Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet*”, Pearson Education Inc., 2<sup>nd</sup> Ed., 2001
- [20] A. Tanenbaum, “*Computer Networks*”, Pearson Education Inc., 4<sup>th</sup> Ed., 2003

- [21] E. Rosen, A. Viswanathan and R. Callon, “*Multiprotocol Label Switching Architecture*”, RFC 3031, Jan. 2001, <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3031.txt>
  
- [22] D. Blumenthal et al., “*All-Optical Label Swapping Networks and Technologies*”, IEEE J. of Lightwave Technology, vol. 18, No. 12, pp. 2058-2075, Dec. 2000
  
- [23] G. Kramer and G. Pesavento, “*Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network*”, IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 2, pp. 66-73, Feb. 2002
  
- [24] S. S. Wagner, H. Kobrinski, T. J. Robe, H. L. Lemberg, and L. S. Smoot, *Electron. Lett.* **24**, 344, 1988
  
- [25] K. M. Sivalingam and S. Subramaniam, “*Emerging Optical Network Technologies*”, Springer Science, Boston, 2005
  
- [26] E. Modiano, “*WDM-Based Packet Networks*”, IEEE Communications Mag., Vol. 37, No. 3, pp.130-135, Mar. 1999



# **Κεφάλαιο 2**

## **Πολυπλεξία Μήκους Κύματος (WDM): Διατάξεις και Τοπολογίες**

## 2.1 Εισαγωγή

Η μακροχρόνια έρευνα πάνω στα φωτονικά δίκτυα, ήδη από τον πρώτο καιρό που έγινε αντιληπτή η χρησιμότητα των οπτικών ινών σαν μέσο μετάδοσης, έδειξε πως η χωρητικότητά τους είναι κατά τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή των παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών δικτύων είτε ενσύρματων, είτε ασύρματων. Το θεωρητικό εύρος ζώνης, που είναι χαρακτηριστικό της οπτικής τεχνολογίας, μπορεί να φτάσει σε τιμές της τάξης των 50 THz που αντιστοιχεί στις περιοχές χαμηλής εξασθένησης της οπτικής ίνας. Σαν αποτέλεσμα οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί μετάδοσης είναι και αυτοί αντίστοιχα κατά τάξεις μεγέθους μεγαλύτεροι από τους συμβατικούς τηλεπικοινωνιακούς διαύλους και θεωρητικά αγγίζουν τις μερικές δεκάδες Tbps. Σε αυτό φυσικά συμβάλλει και το γεγονός ότι οι οπτική τεχνολογία υπερέχει σε σημαντικό βαθμό όσον αφορά την επίδοση σε θόρυβο και παρεμβολές. Η πραγματικότητα μέχρι και περίπου το 1995 ήταν ότι οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί έφταναν τα 10 Gbps το μέγιστο [1]. Οι αιτίες για τους περιορισμούς αυτούς είναι πολλαπλές και μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω:

- 1) Οι ρυθμοί μετάδοσης περιορίζονταν από τις ηλεκτρονικές διατάξεις σε μερικά Gbps.
- 2) Η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης συνεπάγεται την εντονότερη παρουσία μη-γραμμικών φαινομένων όπως επίσης και μεγαλύτερη διασπορά με αποτέλεσμα υποβάθμιση του μεταδιδόμενου σήματος.

Με την εξέλιξη που παρουσίασε ωστόσο η τεχνολογία της **Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing)** έγινε δυνατή η χρήση ολοένα και περισσότερο αριθμού καναλιών. Η πειραματική υλοποίηση, κατασκευή και ευρεία χρήση καινοτόμων πολυκυματικών πηγών αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα στην εξέλιξη των συστημάτων Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος. Στα



πλαίσια αυτά έχουν δειχθεί πειράματα που χρησιμοποιούν ένα μεγάλο αριθμό καναλιών από μια και μόνο διάταξη [2] – [6]. Σε αυτά τα πειράματα η δημιουργία του επιθυμητού φάσματος γίνεται με την εφαρμογή ενός φίλτρου σε ένα ευρύτατο φάσμα, που είναι της τάξης των μερικών THz. Το **Υπερσυνεχές Φάσμα (Supercontinuum)** αυτό προκύπτει είτε από laser που παράγουν εξαιρετικά λεπτούς παλμούς, της τάξης των femtosecond ( $10^{-15}$  sec), είτε με τη διέλευση παλμών της τάξης των picosecond ( $10^{-12}$  sec) από υλικά με διασπορά που προκαλούν πρωτίστως εξάπλωση του φάσματος στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων και στη συνέχεια την επιλογή των διαφόρων καναλιών με το κατάλληλο φίλτρο. Ωστόσο η Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος δεν είναι η μοναδική τεχνική πολυπλεξίας που προορίζεται για οπτικά συστήματα. Μια άλλη τεχνική πολυπλεξίας που είναι ήδη γνωστή από άλλα πεδία των Τηλεπικοινωνιών είναι η **Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiplexing)**. Η τεχνική αυτή, που στα οπτικά συστήματα ορίζεται και ως **Optical Time Division Multiplexing (OTDM)**, διαχωρίζει το χρόνο στον οποίο ο δίαυλος μετάδοσης (στην προκειμένη περίπτωση την οπτική ίνα) είναι διαθέσιμος σε χρονοθυρίδες (time - slots). Κάθε χρονοθυρίδα ανήκει σε ένα ξεχωριστό κανάλι το οποίο και μπορεί να έχει διαθέσιμο όλο το εύρος ζώνης σε αυτό το διάστημα. Υποχρεωτικά όμως σε αυτό το δεδομένο χρονικό διάστημα όλα τα υπόλοιπα κανάλια πρέπει να είναι σε αδράνεια. Αν και η Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου είναι μια πολύ συνηθισμένη πρακτική σε Ασύρματα Δίκτυα αλλά και σε κλασσικά Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα κάτι τέτοιο δεν ισχύει και στα Οπτικά Δίκτυα. Η τεχνολογία OTDM θα μπορούσε να ιδωθεί σαν μια μελλοντική τεχνολογία και αυτό για το λόγο ότι για να μπορεί να υπερέχει της Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος θα πρέπει να υποστηρίζει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης οι οποίοι ωστόσο εισάγουν και έντονα φαινόμενα διασποράς (χρωματικής και τρόπων πόλωσης) κατά τη μετάδοση που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Επιπλέον ο συγχρονισμός κατά τη λειτουργία τέτοιων διατάξεων για την αποφυγή φαινομένων διασυμβολικής παρεμβολής (intersymbol interference) είναι μια εξαιρετικά απαιτητική διαδικασία . Ωστόσο η πολυπλεξία

OTDM παρουσιάζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της WDM που είναι η εξάλειψη μη – γραμμικών φαινομένων όπως η Μίξη Τεσσάρων Φωτονίων (FWM) και η Ετεροδιαμόρφωση Φάσης (XPM) [7] αφού δεν υπάρχουν διαφορετικά κανάλια που να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Επιπλέον γίνεται καλύτερη χρήση των Ενισχυτών Ίνας Ερβίου (EDFA) αφού αποφεύγονται ατέλειες που εισάγονται από αυτούς και γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης τους. Παρ' όλα αυτά εκτός από τις δύο αυτές τεχνικές, που μάλλον θα πρέπει να ιδωθούν σαν συμπληρωματικές τεχνολογίες και όχι σαν ανταγωνιστικές, υπάρχουν και άλλες τεχνικές πολυπλεξίας που είτε έχουν χρησιμοποιηθεί είτε είναι σε πειραματικό επίπεδο. Μια σχετικά δημοφιλής τεχνική είναι η **Πολυπλεξία Υποφέροντος (SubCarrier Multiplexing)** ενώ σε πειραματικό στάδιο είναι η Πολυπλεξία Διαίρεσης Κώδικα (**Code Division Multiplexing**). Στην Πολυπλεξία Υποφέροντος (SCM) τα διάφορα σήματα πολυπλέκονται στο μικροκυματικό επίπεδο και μεταδίδονται μέσα από ένα μήκος κύματος. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι ότι χρησιμοποιεί ήδη γνωστές και δοκιμασμένες διατάξεις της μικροκυματικής τεχνολογίας όπως μικροκυματικοί ταλαντωτές και φίλτρα που η σταθερότητά τους είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή των οπτικών. Τέλος, η τεχνολογία της **Πολυπλεξίας Διαίρεσης Κώδικα (CDM)** είναι σαφώς σε πειραματικό επίπεδο, σε ότι αφορά τουλάχιστον την οπτική τεχνολογία μιας και σε ασύρματα συστήματα έχει χρησιμοποιηθεί σε εμπορικές εφαρμογές, και βασίζεται σε τεχνικές Εξάπλωσης Φάσματος (Spread – Spectrum). Σε κάθε χρήστη ανατίθεται μια ακολουθία ψηφίων η οποία πολλαπλασιαζόμενη με το αρχικό σήμα προκαλεί εξάπλωση του φάσματος του σήματος σε όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Η αντίστροφη διαδικασία γίνεται κατά την αποπολυπλεξία στο δέκτη. Ενδεικτικά θα μπορούσε να αναφερθεί σαν μια διαφορετική τεχνική πολυπλεξίας και η **Πολυπλεξία Διαίρεσης Πόλωσης (Polarization Division Multiplexing)**.

## **2.2 Συστήματα Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM)**

Η Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM) μπορεί να οριστεί σαν μια διαδικασία που έχει στόχο την αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης σε μια οπτική ζεύξη μέσω της χρησιμοποίησης πολλών καναλιών σε διαφορετικά και προκαθορισμένα φέροντα μήκη κύματος. Τα διάφορα φέροντα αυτά μπορούν να έχουν διαφορετικούς και ανεξάρτητους μεταξύ τους ρυθμούς μετάδοσης που στην συνέχεια πολυπλέκονται με οπτικό τρόπο και μεταδίδονται. Ιδιαίτερη προσοχή κατά τη σχεδίαση συστημάτων WDM απαιτείται και καθοριστικοί παράγοντες για αυτό είναι το εύρος των καναλιών καθώς και η μεταξύ τους απόσταση, η ολική οπτική ισχύς που εισάγεται προς μετάδοση, τα μη – γραμμικά φαινόμενα που προκύπτουν καθώς και οι περιορισμοί και οι ατέλειες που έχουν σαν αίτιο την αμιγώς οπτική ενίσχυση με την βοήθεια αμιγώς οπτικών ενισχυτών. Στη συνέχεια ακολουθείται μια ευρύτερη μελέτη στα συστήματα αυτά και εξετάζονται τόσο αρχιτεκτονικές όσο και διατάξεις που αφορούν τα συστήματα αυτά.

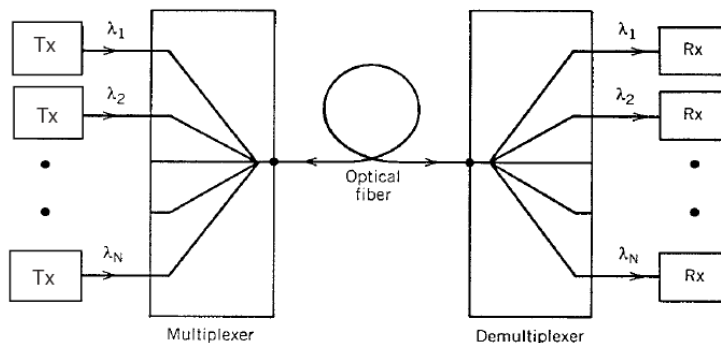
### **2.2.1 Τοπολογίες Δικτύων WDM**

Η πολυπλεξία WDM μπορεί να υιοθετηθεί σε πολλές τοπολογίες και αρχιτεκτονικές ως βασική μέθοδος αύξησης του ολικού ρυθμού μετάδοσης αλλά και διαχείρισης των επιμέρους καναλιών.

#### **2.2.1.1 Ζεύξεις Σημείου – προς – Σημείο Υψηλής Χωρητικότητας**

Μια πρώτη προσέγγιση για τη χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι σε ζεύξεις σημείου – προς – σημείο υψηλής χωρητικότητας. Οι ζεύξεις αυτές υποστηρίζουν τεράστιους ρυθμούς μετάδοσης που έχουν φτάσει πλέον πάνω από το όριο του 1 Tbps και γενικά συναντώνται εμπορικά σε υποθαλάσσια συστήματα. Πειραματικά έχουν δειχθεί πολλές εφαρμογές με ολοένα και αυξανόμενο το μέγεθος  $B*L$  όπου  $B$  ο

συνολικός υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης ( $B = B_1 + B_2 + \dots + B_N$ ) και  $L$  η απόσταση μετάδοσης [8] – [10]. Μια σχηματική απεικόνιση της παραπάνω φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση ζεύξης σημείου-προς-σημείο [1]

Η ολική χωρητικότητα των συστημάτων μετάδοσης WDM εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των καναλιών και για το λόγο αυτό μπορούμε να κάνουμε έναν επιπλέον ακόμα διαχωρισμό σε συστήματα CWDM (Coarse WDM) και DWDM (Dense WDM). Στα CWDM συστήματα η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι της τάξης των μερικών nm ενώ στα DWDM είναι της τάξης του 1 nm. Συγκεκριμένα, για απόσταση μεταξύ των καναλιών στα 100 GHz έχουμε ~0,8 nm όπως καθορίζεται από την ITU, ενώ έχει οριστεί και φασματικό πλέγμα με απόσταση 50 GHz (βλ. Παράρτημα Α). Στο φάσμα της περιοχής χαμηλής εξασθένησης των 1550 nm η ITU έχει ορίσει 3 ζώνες μετάδοσης τις S (1491.88 – 1529.55 nm), C (1529.94 – 1569.59 nm) και L (1570.01 – 1611.79 nm). Αυτή η συνολική περιοχή δίνει φασματικό άθροισμα 15 THz που αντιστοιχούν σε 120 nm. Ωστόσο το εύρος ζώνης αυτό παρ' ότι φαίνεται ελκυστικό, είναι πολύ δύσκολο να εκμεταλλευτεί σωστά λόγω των σημαντικών περιορισμών που εισάγονται από τη χρήση των *Ενισχυτών Ίνας Ερβίου (EDFA)*. Οι ενισχυτές αυτοί έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης που σε πολλές περιπτώσεις είναι της τάξης των 40 nm και έτσι δεν καλύπτουν όλο το φάσμα γύρω από την περιοχή των 1550 nm. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η χρήση *Ενισχυτών Raman* που έχουν εύρος ζώνης της τάξης των 100 nm. Άλλοι παράγοντες που μπορούν να εισάγουν

περιορισμούς στη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις είναι η σταθερότητα των *Laser Κατανεμημένης Ανάδρασης* (**Distributed FeedBack Lasers**), η υποβάθμιση του μεταδιδόμενου σήματος λόγω μη – γραμμικών φαινομένων και η διασυμβολική παρεμβολή μεταξύ των καναλιών μετάδοσης.

Σε ότι αφορά τις προοπτικές των ζεύξεων σημείου – προς – σημείο αυτό που απασχολεί περισσότερο την ερευνητική κοινότητα είναι η αύξηση του ρυθμού στη μετάδοση αλλά και η αναγέννηση του σήματος με αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο.

### 2.2.1.2 Δίκτυα Ευρείας και Μητροπολιτικής Ζώνης

Πέρα από αυτού του τύπου τις ζεύξεις η τεχνολογία WDM επεκτείνεται σε Δίκτυα Ευρείας (WAN), Μητροπολιτικής (MAN) και Τοπικής Ζώνης (LAN) όπου όλα βασίζονται, τουλάχιστον σε πρώτη φάση, σε δρομολόγηση μήκους κύματος [11].

Τα WAN παραδοσιακά καλύπτουν περιοχές ευρείας κλίμακας, συνήθως σε εθνικό επίπεδο, και αφορούν είτε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, είτε δίκτυα δεδομένων. Τα δίκτυα αυτά συνήθως είναι σε τοπολογίες μερικώς διασυνδεδεμένες (*mesh networks*) [12]. Οι κόμβοι που αποτελούν τα δίκτυα αυτά διασυνδέονται είτε με εικονικά κυκλώματα, είτε με μεταγωγή πακέτου υιοθετώντας κάποια από τα γνωστά πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτου όπως IP, ATM κτλ. Η τεχνολογία WDM συνέβαλε καθοριστικά στην μετατροπή αυτών των ζεύξεων σε υψηλής χωρητικότητας. Ωστόσο η τεχνολογία αυτή αναμένεται να προσδώσει και κάποιου είδους ευφυΐα στο φυσικό στρώμα του δικτύου αφού πραγματοποιείται μεταγωγή μήκους κύματος σε αμιγώς οπτικό επίπεδο. Μια άλλη προσέγγιση ακολουθεί τη λογική της τοπολογίας πολλών διασυνδεδεμένων δακτυλιδιών (*interconnected rings*).

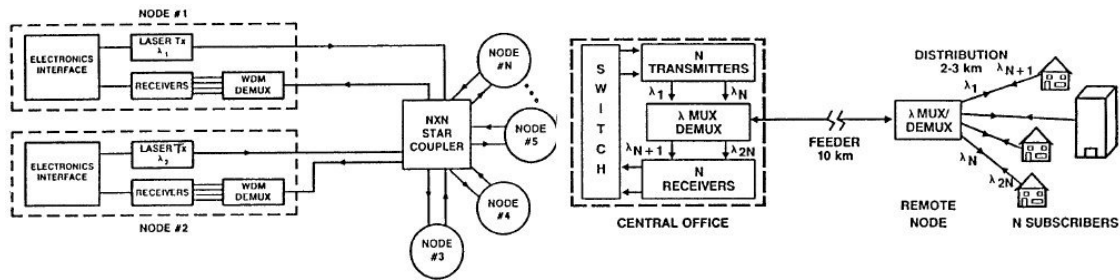
Τα Δίκτυα Μητροπολιτικής Ζώνης διασυνδέουν κόμβους σε μια περιοχή περιορισμένη στη γεωγραφική έκταση μιας μεγάλης πόλης. Στα δίκτυα αυτά συνήθως ακολουθείται η αρχιτεκτονική δακτυλιδιού με πολυπλεξία CWDM. Επιπρόσθετα, δύο οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται

(η μια από αυτές σε περιπτώσεις εφεδρική). Αυτά τα δίκτυα ως πρόσφατα χρησιμοποιούσαν ηλεκτρονική επεξεργασία του οπτικού σήματος αν και έχει δειχθεί με ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα ένα αμιγώς οπτικό μητροπολιτικό δίκτυο, το **MONET** [13]. Τα κανάλια του δικτύου αυτού απέχουν μεταξύ τους 200 GHz στην περιοχή των 1550 nm και μπορεί να υποστηρίξει διάφορα πρωτόκολλα ανωτέρου επιπέδου (ATM, SDH).

Όλα τα ερευνητικά προγράμματα που προσανατολίζονται σε φωτονικά δίκτυα μεσαίας και ευρείας ζώνης έχουν σαν απώτερο σκοπό την αμιγώς οπτική επεξεργασία του σήματος απαλλάσσοντας έτσι το δίκτυο ολοένα και περισσότερο από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

### 2.2.1.3 Δίκτυα Πολλαπλής Πρόσβασης

Τα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης παρέχουν στους χρήστες τους την ικανότητα αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ δύο οποιωνδήποτε ή και περισσότερων χρηστών που ανήκουν στο δίκτυο αυτό. Σε πολλές περιπτώσεις ακόμη η πρόσβαση στο δίκτυο ενός παρόχου γίνεται μέσω ηλεκτρονικού εξοπλισμού όπως για παράδειγμα στον ενσύρματο τοπικό βρόχο που συνδέει τον οικιακό χρήστη με το δίκτυο του παρόχου ή σε τοπικά δίκτυα (LAN) όπως για παράδειγμα το Ethernet. Λόγω της χρήσης ηλεκτρονικού εξοπλισμού η ταχύτητες πρόσβασης δεν μπορούν να ξεπεράσουν τα ανώτατα όρια που είναι της τάξης των μερικών Gbps. Η πολλαπλή πρόσβαση μέσω WDM δίνει τη δυνατότητα για δρομολόγηση μήκους κύματος και διαμοιρασμό των καναλιών στους χρήστες του δικτύου. Οι πλέον συνηθισμένες τοπολογίες δεν διαφέρουν σημαντικά από ότι σε άλλες περιπτώσεις και έτσι μπορούμε να έχουμε ένα δαχτυλίδι WDM, ένα μερικώς διασυνδεδεμένο δίκτυο ή τέλος μια τοπολογία αστέρα [14]. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων δικτύων είναι το **Lambdanet** [15] αλλά και ο **Παθητικός Οπτικός Τοπικός Βρόχος (passive optical loop)** [16].



Σχήμα 2.2: Αρχιτεκτονικές *Lambdanet* και Παθητικού Οπτικού Τοπικού βρόχου [15], [16]

Στην πρώτη περίπτωση έχουμε αρχιτεκτονική μετάδοσης – και – επιλογής (broadcast – and – select) ενώ στη δεύτερη αρχιτεκτονική Παθητικού Οπτικού Δικτύου (**P**assive **O**ptical **N**etwork).

Η έρευνα πάνω στις φωτονικές τεχνολογίες πρόσβασης είναι διαρκώς εξελισσόμενη και γίνεται μεγάλη προσπάθεια για μείωση του κόστους της προσαρμογής των δικτύων πρόσβασης στη σύγχρονη φωτονική προοπτική. Ο άωτερος σκοπός είναι η ικανότητα του δικτύου πρόσβασης να μεταφέρει κάθε τύπο δεδομένων στον οικιακό χρήστη όπως τηλέφωνο, βίντεο και δεδομένα με χαμηλό κόστος σε υψηλές ταχύτητες. Ιδιαίτερα η μείωση του κόστους του εξοπλισμού θα είναι καθοριστικής σημασίας για τους παρόχους που θέλουν να αντικαταστήσουν τον παραδοσιακό εξοπλισμό του τηλεφωνικού δικτύου με οπτικό εξοπλισμό. Οι οπτικές πολυκυματικές πηγές με χαμηλό κόστος κατασκευής θα αποτελέσουν θεμελιώδες στοιχείο στην έλευση αυτής της νέας πραγματικότητας που ωστόσο κανείς δεν μπορεί να αμφισβητήσει ότι η απαιτήσεις για σημαντικές επενδύσεις από τη μεριά των παρόχων την κάνουν προς το παρόν εμπορικά ασύμφορη.

### 2.2.2 Διατάξεις Δικτύων WDM

Η εφαρμογή των καινοτομιών που εισάγει η ολοένα και μεγαλύτερη διείσδυση της αμιγώς οπτικής τεχνολογίας δεν θα μπορούσε να είναι πραγματικότητα χωρίς την πολυετή έρευνα που έχει γίνει και συνεχίζεται αδιάκοπα στον τομέα των οπτικών διατάξεων. Η οπτική τεχνολογία παρέχει πολλή γνώση για τη λειτουργία διαφόρων

θεμελιωδών οπτικών στοιχείων που δομούνται ιεραρχικά και σχηματίζουν αμιγώς οπτικές διατάξεις. Μερικές από τις διατάξεις που έχουν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο περιγράφονται και αναλύονται παρακάτω [1],[7],[11],[14],[17].

### 2.2.2.1 Οπτικές ίνες

Βασικό και περισσότερο δομικό στοιχείο των συστημάτων WDM είναι οι κοινές μονορυθμικές οπτικές ίνες. Οι περισσότερες ίνες που είναι εγκατεστημένες υπάρχουν εδώ και πολλά χρόνια ήδη από τον πρώτο καιρό της χρήσης των οπτικών ινών. Οι ίνες γενικά έχουν την ικανότητα κυματοδήγησης ενός οπτικού σήματος μεγάλου εύρους ζώνης με χαμηλή εξασθένιση, υψηλό SNR και εξαιρετική ανοχή σε παρεμβολές. Η λειτουργία των οπτικών ινών είναι γνωστή εδώ και πολλά χρόνια και έχει αναλυθεί εκτενώς. Ωστόσο η έρευνα γύρω από αυτές έχει δείξει νέους τύπους οπτικών ινών (*Photonic Crystal Fibers*) που μπορούν να αποτελέσουν τόσο δομικό στοιχείο μετάδοσης των μελλοντικών δικτύων όσο και στοιχείο διατάξεων εξειδικευμένων εφαρμογών (π.χ. σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη διασπορά).

### 2.2.2.2 Οπτικά Φίλτρα

Η χρησιμότητα των οπτικών φίλτρων – συμβολόμετρων είναι τεράστια στην σύγχρονη οπτική τεχνολογία λειτουργώντας είτε σαν φίλτρα, είτε σαν δομικά στοιχεία για την υλοποίηση κυκλωμάτων αμιγούς οπτικής λογικής, ειδικά για *Αμιγώς Οπτική Μεταγωγή* (all optical switching). Τα στοιχεία αυτά μπορούν να είναι συντονιζόμενα σε κάποιες συχνότητες ή να έχουν προκαθορισμένο φάσμα. Μερικά από αυτά παρουσιάζονται σύντομα παρακάτω:

#### Συμβολόμετρο Fabry - Perot

Το *Συμβολόμετρο Fabry – Perot* είναι από τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα συντονιζόμενα οπτικά φίλτρα, όπως και τα



**Συμβολόμετρα Mach – Zehnder**, και αποτελείται από μια κοιλότητα στα άκρα της οποίας βρίσκονται δύο ανακλαστικές επιφάνειες. Οι ιδιότητες των επιφανειών αυτών μπορούν να καθοριστούν από την ανακλαστικότητα των επιφανειών αυτών η οποία ορίζεται ως  $R$  και τις απώλειες  $A$ . Η συνάρτηση μεταφοράς του συμβολόμετρου Fabry – Perot δίνεται παρακάτω <sup>2</sup>:

$$T(f) = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{2\sqrt{R}}{1-R} \sin \frac{4\pi f \tau}{2}\right)^2\right]^{-1} \quad (2.1)$$

Βασικά χαρακτηριστικά των στοιχείων αυτών είναι η **Ελεύθερη Φασματική Περιοχή (Free Spectral Range)** και το **Εύρος Ημίσειας Ισχύος (Full Width at Half Maximum)** που ορίζονται ως εξής:

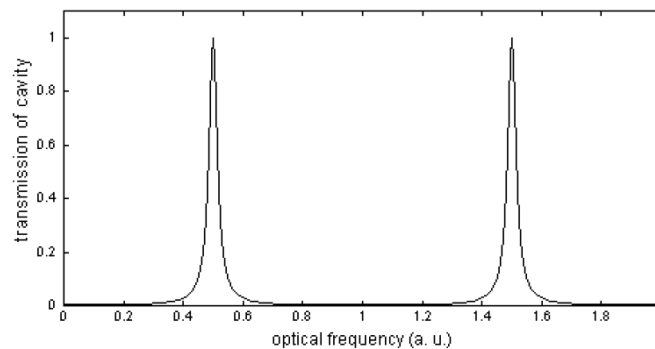
$$FSR = \frac{1}{2\tau} = \frac{c}{2nL} \quad (2.2)$$

$$FWHM = \frac{c}{2nL} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}} \quad (2.3)$$

Από τις δύο παραμέτρους αυτές προκύπτει και η **Λεπτότητα** του φίλτρου (**Finesse**):

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (2.4)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς (συνάρτηση του Airy) για διάφορες τιμές του  $R$  και αντίστοιχα του  $F$  φαίνεται παρακάτω:

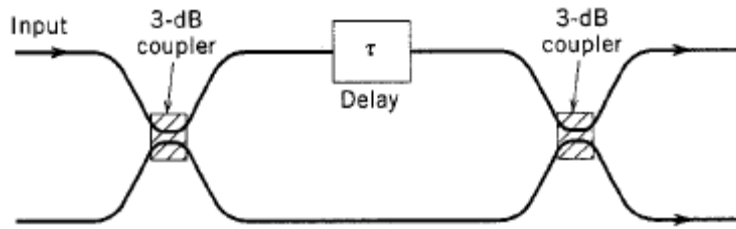


Διάγραμμα 2.1: Συνάρτηση μεταφοράς του συμβολόμετρου Fabry – Perot για διάφορες τιμές του  $R$

<sup>2</sup> Σε επόμενο κεφάλαιο θα δοθεί περισσότερη λεπτομέρεια στην ανάλυση και τις λειτουργίες των Συμβολόμετρων Fabry – Perot.

### Συμβολόμετρο Mach – Zehnder

Μια άλλη διάταξη που έχει χρησιμοποιηθεί είναι το **Συμβολόμετρο Mach – Zehnder**. Η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να κατασκευαστεί πολύ εύκολα με δύο συζεύκτες 3-dB σε σειρά και την παρεμβολή μιας γραμμής καθυστέρησης στον ένα βραχίονα της διάταξης όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω:



Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση του συμβολόμετρου Mach – Zehnder [1]

Η καθυστέρηση που υπόκειται το οπτικό σήμα στον πάνω βραχίονα οδηγεί σε διαφορετική ολίσθηση φάσης των σημάτων στον κάθε βραχίονα. Η συνάρτηση μεταφοράς δίνεται από τη σχέση:

$$T(f) = |H(f)|^2 = \cos^2(\pi f \tau) \quad (2.5)$$

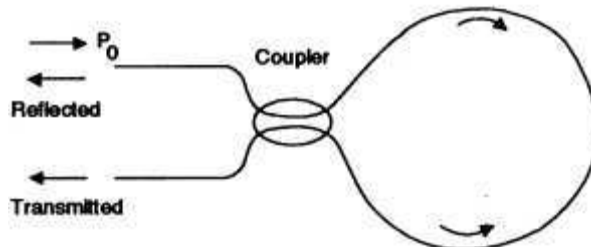
όπου  $\tau$  είναι η σχετική χρονική καθυστέρηση που υπόκειται το σήμα. Μια αλυσίδα τέτοιων συμβολόμετρων μπορεί να λειτουργήσει σαν συντονιζόμενο οπτικό φίλτρο με συνάρτηση μεταφοράς:

$$T(f) = |H(f)|^2 = \prod_{m=1}^M \cos^2(\pi f \tau_m) \quad (2.6)$$

όπου  $\tau_m$  είναι η καθυστέρηση του  $m$  – οστού συμβολόμετρου. Μπορεί να δειχθεί ότι επιλέγοντας με συγκεκριμένο τρόπο τις καθυστερήσεις  $\tau_m$  ( $\tau_m = (2^m \Delta\nu_{ch})^{-1}$  όπου  $\Delta\nu_{ch}$  είναι η απόσταση μεταξύ των καναλιών) μπορούμε με 10 διαδοχικά Mach – Zehnder να επιτύχουμε λεπτότητα αντίστοιχη με ενός Fabry – Perot της τάξης των 1600 [1]. Επιπλέον τα συμβολόμετρα Mach – Zehnder, όπως επίσης και τα Fabry – Perot, έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές όπως για ανάκτηση ρολογιού, κατασκευή πολυκυματικών πηγών, αλλά και υλοποίηση αμιγώς οπτικής λογικής [18] – [20].

**Άλλοι τύποι συντονιζόμενων Συμβολόμετρων**

Μιά άλλη υλοποίηση ενός συμβολομέτρου είναι αυτή του *Συμβολομέτρου Sagnac*:



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση Συμβολομέτρου Sagnac [21]

Το συμβολόμετρο Sagnac μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί συνδέοντας ένα τμήμα οπτικής ίνας στις εξόδους ενός συζεύκτη. Λόγω της παρουσίας του συζεύκτη συμβαίνουν φαινόμενα συμβολής τα οποία μπορούν να εκμεταλλευτούν με διάφορους τρόπους για διάφορες λειτουργίες. Επίσης η λειτουργία υπό μη – γραμμικό καθεστώς είναι πολύ συνηθισμένη παρέχοντας πολλές εφαρμογές. Μια άλλη διάταξη συμβολόμετρου είναι το Συμβολόμετρο **Michelson** του οποίου η λειτουργία μοιάζει με αυτή του Mach – Zehnder.

**Οπτικά φίλτρα τύπου Bragg (Φράγματος Μεταγωγής)**

Τα φίλτρα αυτού του τύπου βασίζονται στην φωτοεπαγόμενη μεταβολή του δείκτη διάθλασης με τη βοήθεια προσμίξεων Ge. Τα φράγματα αυτά ανακλούν πίσω στην πηγή όλα τα ανεπιθύμητα μήκη κύματος ή ένα συγκεκριμένο επιτρέποντας την διέλευση όλων των άλλων. Χαρακτηριστικά των φίλτρων αυτών είναι η ανακλαστικότητα και το εύρος ζώνης και έχουν ιδιαίτερη εφαρμογή σε δίκτυα DWDM στην πολυπλεξία και αποπολυπλεξία των διαφόρων μηκών κύματος (κατασκευή OADM) [22].

### **Φίλτρα Διηλεκτρικών Επιστροφών**

Τα διηλεκτρικά φίλτρα βασίζουν τη λειτουργία τους σε φαινόμενα συμβολής και αποτελούνται από μια συστοιχία διηλεκτρικών στρωμάτων. Η κατασκευή τους γίνεται με την εναλλάξ εναπόθεση διηλεκτρικών στρωμάτων με μικρό και μεγάλο δείκτη διάθλασης αντίστοιχα. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος αλλά περισσότερο ως ζωνοπερατά φίλτρα για την απομόνωση συγκεκριμένων καναλιών.

### **2.2.2.3 Αμιγώς Οπτικοί Ενισχυτές**

Είναι γεγονός ότι η μετάδοση πολλών καναλιών μήκους κύματος μέσα από μια οπτική ίνα δεν θα μπορούσε να είναι εφικτή χωρίς την παρουσία σε μια ζεύξη μετάδοσης των αμιγώς οπτικών ενισχυτών. Οι τρεις σημαντικότεροι τύποι ενισχυτών είναι οι εξής:

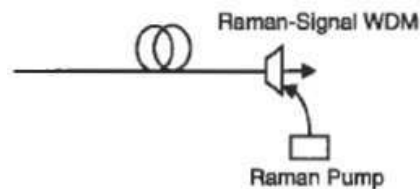
1. Οπτικοί Ενισχυτές Ημιαγωγού (SOA)
2. Ενισχυτές Ίνας Ερβίου (EDFA)
3. Ενισχυτές Raman

Οι αμιγώς οπτικοί ενισχυτές είναι υψίστης σημασίας για την υλοποίηση ενός συστήματος μετάδοσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η O/E/O μετατροπή που χρησιμοποιούταν παλαιότερα περιόριζε σημαντικά το εύρος ζώνης μετάδοσης. Οι σημερινοί ενισχυτές προφανώς παρουσιάζουν ολοένα και καλύτερα χαρακτηριστικά μετάδοσης περιορίζοντας τις όποιες ατέλειες εισάγουν κατά την μετάδοση, κυρίως λόγω μη – γραμμικών φαινομένων. Οι Οπτικοί Ενισχυτές Ημιαγωγού (SOA) είναι από τους πρώτους τύπους οπτικών ενισχυτών που χρησιμοποιήθηκαν και η αρχή λειτουργίας τους προέρχεται από τα Laser Ημιαγωγών όταν αυτά λειτουργούν σε πόλωση κάτω από το κατώφλι.

Οι Ενισχυτές Ίνας Ερβίου (EDFA), που είναι και οι πλέον δημοφιλείς, είναι μέρος της γενικότερης κατηγορίας ενισχυτών που βασίζουν τη λειτουργία τους στις λεγόμενες Σπάνιες Γαίες (Έρβιο,

Νεοδύμιο κτλ.) [23]. Σε αυτούς τους ενισχυτές ακτινοβολία σε μήκη κύματος 980 ή 1480 nm χρησιμοποιείται για την διέγερση των ιόντων Ερβίου ( $\text{Er}^{3+}$ ), αν και η απορρόφηση είναι καλύτερη στα 980 nm. Διεγείροντας τα ιόντα Ερβίου αυτά αποδιεγείρονται στην περιοχή των 1550 nm, που είναι και η πλέον σημαντική για τις οπτικές επικοινωνίες, παρέχοντας έτσι ενισχυμένο το σήμα που εισάγεται σε αυτούς.

Τέλος, οι ενισχυτές Raman είναι μια άλλη κατηγορία αμιγώς οπτικών ενισχυτών. Η λειτουργία των ενισχυτών αυτών βασίζεται στο φαινόμενο της διεγερμένης σκέδασης Raman που εμφανίζεται στις οπτικές ίνες πυριτίου.



Σχήμα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση Ενισχυτή Raman

Η σκέδαση Raman είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο ένα υψηλής ενέργειας φωτόνιο αλληλεπιδρά με τα μόρια του διηλεκτρικού με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός δευτέρου φωτονίου χαμηλότερης ενέργειας και ενός άλλου κύματος γνωστού ως φωνόνιο, που στην περίπτωση της σκέδασης Raman έχουμε οπτικά φωνόνια που υπολογίζονται έτσι ώστε να διατηρείται η ενέργεια και η ορμή. Αν η ισχύς άντλησης είναι κατάλληλη λόγω των μηχανισμών σκέδασης ένα μεγάλο μέρος της ισχύος μεταφέρεται από το μήκος κύματος άντλησης στο επιθυμητό μήκος κύματος που θέλουμε να ενισχύσουμε. Για να παρουσιάζουν οι απώλειες εκθετική αύξηση θα πρέπει να ισχύει ότι:

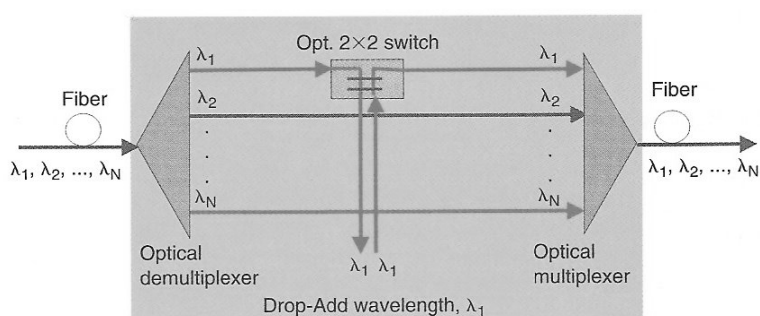
$$P_{th} \approx 16 \frac{A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (2.7)$$

όπου  $P_{th}$  είναι το κατώφλι ισχύος,  $A_{eff}$  είναι η ενεργός διατομή της ίνας,  $g_R$  η σταθερά κέρδους της SRS και  $L_{eff}$  το ενεργό μήκος

διάδοσης. Έτσι έχουμε μεταφορά ισχύος από τη μήκος άντλησης στο επιθυμητό. Το συγκριτικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι ενισχυτές Raman σε σχέση με τους EDFA έγκειται στο ότι έχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης λειτουργίας από αυτούς που μπορεί να φτάσει τα 70 nm και επιπλέον μπορούν να συντονιστούν σε μεγαλύτερο εύρος μηκών κύματος. Επιπλέον οι ενισχυτές Raman εμφανίζουν υψηλότερη ισχύ εξόδου και έχουν καλύτερο συντελεστή θορύβου (noise figure). Ανάλογα με την εφαρμογή και το αναμενόμενο κόστος η επιλογή των κατάλληλων ενισχυτών είναι σημαντική. Ιδιαίτερα σε συστήματα μεγάλης απόστασης (long – haul applications) ο συνδυασμός των δύο αυτών τύπων ενισχυτών είναι η πλέον συνηθισμένη πρακτική.

#### 2.2.2.4 Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθήκης/Αφαίρεσης

Ένα από τα πλέον σημαντικά στοιχεία που επέτρεψαν την τεχνολογία DWDM είναι οι **Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθήκης/Αφαίρεσης (Optical Add – Drop Multiplexers)**. Οι OADMs είναι διατάξεις που κατά τη διέλευση ενός πολυπλεγμένου σήματος μέσα από αυτούς, έχουν την ικανότητα να προσθέτουν ή να αφαιρούν ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος και να γράφουν/διαβάζουν τη ροή των bits που πρέπει αυτό να μεταφέρει [14].



Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας OADM [14]

Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται σε σημεία της ζεύξης που είναι απαραίτητος ο τερματισμός ορισμένων συνδέσεων μήκους κύματος [11] και κατά κύριο λόγο σε μεσαίας και ευρείας κλίμακας δίκτυα. Βασικό

δομικό στοιχείο της διάταξης αυτής είναι ο αμιγώς οπτικός διακόπτης 2x2, που μπορεί να ελέγχεται δυναμικά ή όχι. Ο ρόλος του διακόπτη αυτού είναι να αφαιρεί ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος και να «γράφει» πάνω σε αυτό μια άλλη ροή πληροφορίας.

### 2.2.2.5 Παθητικός Συζεύκτης Αστέρα

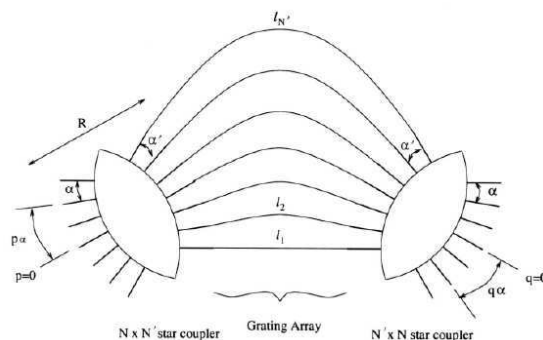
Σε δίκτυα κοινοποίησης και επιλογής (broadcast and select) το δομικό στοιχείο είναι ο **Παθητικός Συζεύκτης Αστέρα (Passive Star Coupler)**. Η διάταξη αυτή αποτελείται συνήθως από έναν αριθμό θυρών εισόδου  $M$  και εξόδου  $N$  που σε πολλές περιπτώσεις ταυτίζονται και έχει την ικανότητα να μεταδίδει τα σήμα από κάθε θύρα εισόδου σε κάθε θύρα εξόδου διαιρώντας την ισχύ εισόδου κατά ίσα τμήματα [24]:

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{N} \quad (2.8)$$

Ο Παθητικός Συζεύκτης Αστέρα βρίσκει πολλές εφαρμογές σε δίκτυα μετάδοσης, όπως για παράδειγμα σε δίκτυα ψηφιακής καλωδιακής τηλεόρασης, σε εφαρμογές LAN και γενικά σε Παθητικά Οπτικά Δίκτυα μικρής εμβέλειας.

### 2.2.2.6 Δρομολογητές Μήκους Κύματος

Μια άλλη διάταξη που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε δίκτυα Πολυπλεξίας Διάρθρωσης Μήκους Κύματος είναι οι **Δρομολογητές Μήκους Κύματος (Wavelength Routers)**.

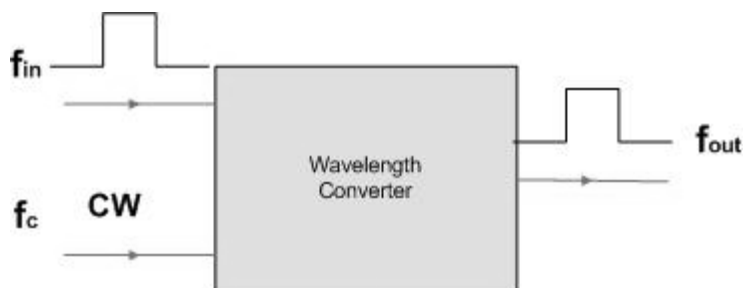


Σχήμα 2.7: Δρομολογητής Μήκους Κύματος

Οι διατάξεις αυτές παρά το ότι είναι στατικές μπορούν να είναι ιδιαίτερα χρήσιμες ως αποπολυπλέκτες μηκών κύματος. Συγκεκριμένα, τα οπτικά σήματα που εισέρχονται στις  $N$  εισόδους της διάταξης αποπολυπλέκονται σε ανεξάρτητα κανάλια και κατευθύνονται στις  $N$  θύρες εξόδου.

### 2.2.2.7 Μετατροπείς Μήκους Κύματος

Η αρχιτεκτονική που έχει ως τώρα διαμορφωθεί στα δίκτυα WDM απαιτεί για την λειτουργία τους την **Μετατροπή Μήκους Κύματος (Wavelength Conversion)** σε ορισμένους κόμβους. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διατάξεις που πραγματοποιούν μετατροπή μήκους κύματος. Η λειτουργία των διατάξεων αυτών είναι η μετατροπή μιας ροής δεδομένων, που είναι διαμορφωμένη σε ένα φέρον μήκος κύματος  $\lambda_1$ , σε ένα άλλο μήκος κύματος  $\lambda_2$  χωρίς καμιά αλλαγή στην πληροφορία. Για την υλοποίηση τέτοιων διατάξεων έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι [25]. Μερικές από αυτές τις μεθόδους στηρίζονται στο φαινόμενο της Μίξης Τεσσάρων Φωτονίων (FWM) αλλά και σε άλλες μη – γραμμικότητες που συναντώνται σε οπτικά συστήματα, όπως η Ετεροδιαμόρφωση Κέρδους (Cross – Gain Modulation) και Ετεροδιαμόρφωση Φάσης (Cross – Phase Modulation), ιδιαίτερα σε Ημιαγώγιμους Οπτικούς Ενισχυτές.



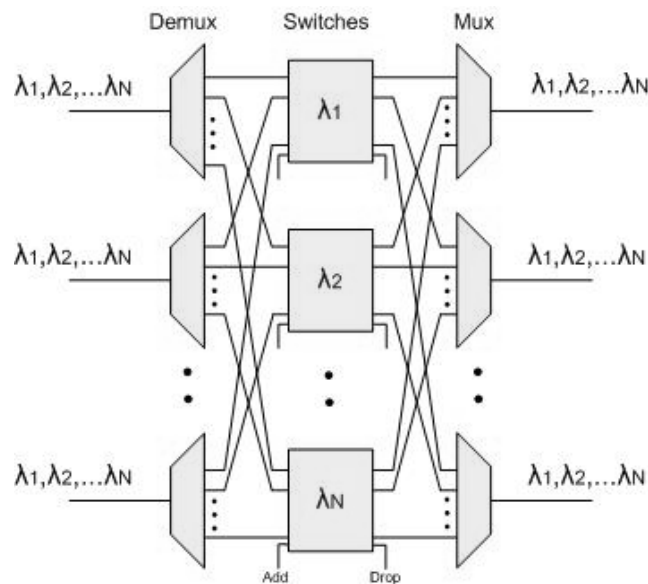
Σχήμα 2.8: Γενική αρχή λειτουργίας Μετατροπέα Μήκους Κύματος



Σε πολλές περιπτώσεις το μη – γραμμικό στοιχείο αυτό είναι ένας ενισχυτής ημιαγωγού (SOA) [26] ή ακόμη και ένα συμβολόμετρο Mach – Zehnder με SOA σε κάθε βραχίονα του [27]. Σε κάθε περίπτωση το μήκος κύματος του σήματος εξόδου είναι συνάρτηση των σημάτων εισόδου και προκύπτει ως μη – γραμμικό παράγωγο αυτών των δύο.

### 2.2.2.8 Οπτικά Στοιχεία Διασύνδεσης

Βασικό στοιχείο σε μεγάλης κλίμακας Οπτικά Δίκτυα WDM είναι τα **Οπτικά Στοιχεία Διασύνδεσης (Optical Cross Connects)**. Τα OXCs αποτελούν τα βασικό στοιχείο που επιτελεί δρομολόγηση μήκους κύματος σε ένα αμιγώς Οπτικό Δίκτυο WDM και μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορες τεχνολογίες [11]. Το θεμελιώδες δομικό στοιχείο από το οποίο αποτελείται ένα OXC είναι ο 2x2 διακόπτης ο οποίος μπορεί να είναι είτε μικρο – ηλεκτρομηχανικός (MEMS), είτε θερμο – οπτικός, είτε ηλεκτρο – οπτικός, είτε ακόμη και αμιγώς οπτικός. Για την τεχνολογία των αμιγώς οπτικών διακοπών 2x2 πιθανές υλοποιήσεις είναι με συμβολόμετρα Mach – Zehnder ή με SOA.



Σχήμα 2.9: Αναπαράσταση Οπτικού Στοιχείου Διασύνδεσης (OXC)

### **2.2.2.9 Πομποί/Δέκτες για Συστήματα WDM**

Ένα από τα περισσότερο βασικά στοιχεία για την ανάπτυξη και εμπορική χρήση της τεχνολογίας WDM αλλά και της οπτικής τεχνολογίας γενικώς είναι η ανάπτυξη οπτικών πηγών laser. Στην τεχνολογία WDM απαιτούνται πηγές οι οποίες εκτός από τις καλές ιδιότητες που εμφανίζουν τα laser θα πρέπει να έχουν την ικανότητα είτε να λειτουργούν συντονιζόμενες σε διάφορα κανάλια, είτε να παράγουν φέροντα για όλα τα κανάλια και στη συνέχεια να γίνεται επιλογή. Σε εμπορικά διαθέσιμα συστήματα χρησιμοποιούνται συστοιχίες laser τύπου **DFB (Distributed FeedBack Laser)** τα οποία ωστόσο δεν έχουν την ικανότητα να παράγουν μεγάλο αριθμό από διαμορφώσιμα φέροντα. Έτσι έχουν προκύψει δύο τύποι πηγών που χρησιμοποιούνται ως πομποί για τέτοιου είδους εφαρμογές και έτσι έχουμε:

- A.** Lasers που λειτουργούν σε μια συχνότητα και έχουν μεγάλο εύρος συντονισμού
- B.** Πολυκυματικές πηγές που παράγουν ταυτόχρονα όλα τα προς χρήση στο σύστημα κανάλια

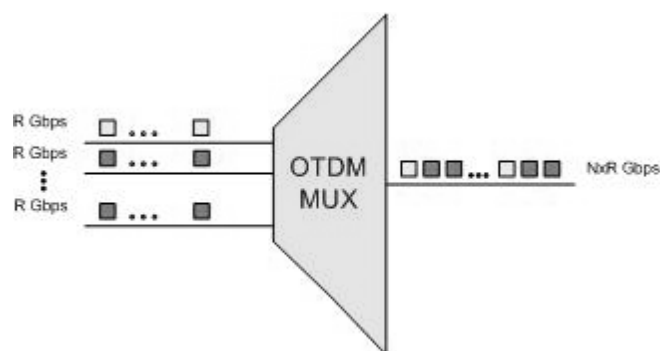
Η μέχρι σήμερα έρευνα έχει κάνει περισσότερο ελκυστική την ιδέα των **Πολυκυματικών Πηγών (Multiwavelength Sources)** με διάφορες υλοποιήσεις που έχουν παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια [2] – [6]. Πρέπει να τονιστεί ότι οι διάφορες πηγές που έχουν κατά καιρούς παρουσιαστεί θα πρέπει να είναι συντονισμένες στο πλέγμα της ITU που ορίζει ακριβώς τα μήκη κύματος των καναλιών κάθε ζώνης μετάδοσης για απόσταση 50 και 100 GHz (βλ. Παράρτημα Α). Μια κλασική τεχνική είναι η μονολιθική ολοκλήρωση πολλών DFB ή DBR lasers και το συντονισμό και τη σταθεροποίηση αυτών με διάφορους τρόπους [27], [28]. Επιπλέον μια άλλη μέθοδος ολοκληρώνει μέσα σε μια κοιλότητα laser ένα **AWG (Arrayed Waveguide Grating)** δίνοντας 18 κανάλια [29], ενώ σε μια άλλη προσέγγιση σε μια κοιλότητα laser μπορούν να ολοκληρωθούν ένα φίλτρο Fabry – Perot ή άλλοι

συνδυασμοί διατάξεων που να παράγουν αντίστοιχο φάσμα. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει τραβήξει τα τελευταία χρόνια η μέθοδος της **Φασματικής Τμηματοποίησης (Spectral Slicing)**. Σε αυτή τη μέθοδο εφαρμόζεται ένα φίλτρο (συνήθως Fabry – Perot) σε ένα υπερσυνεχές φάσμα (supercontinuum) το οποίο είτε μπορεί να προκύψει από ένα laser που μπορεί να παράγει εξαιρετικά λεπτούς παλμούς, στο πεδίο των femtosecond, είτε από τις μη – γραμμικές ιδιότητες που εμφανίζουν ορισμένοι τύποι οπτικών ινών.

Από την οπτική γωνία του δέκτη η κατάσταση φαντάζει λιγότερο περίπλοκη αφού σε συστήματα WDM είναι απαραίτητο να υπάρχει στο άκρο του δέκτη μια συστοιχία από φωτοδιόδους αλλά και ενός αποπολυπλέκτη που να διαχωρίζει τα επιμέρους κανάλια. Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτού του τύπου οι διατάξεις έχουν υλοποιηθεί μονολιθικά [30] ενώ σε άλλες υλοποιήσεις έχουν ολοκληρωθεί και ηλεκτρονικοί ενισχυτές.

### 2.3 Συστήματα Οπτικής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Χρόνου (OTDM)

Η **Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (TDM)** είναι μια κλασική πλέον τεχνική, τουλάχιστον όσον αφορά ηλεκτρονικά συστήματα, που επιτρέπει την αύξηση του συνολικά μεταδιδόμενου ρυθμού. Η βασική αρχή της τεχνολογίας αυτής είναι η διαίρεση του χρόνου σε χρονοθυρίδες (time – slots) κατά τις οποίες ένας χρήστης δικαιούται να λάβει ή να στείλει πληροφορία χρησιμοποιώντας όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης.



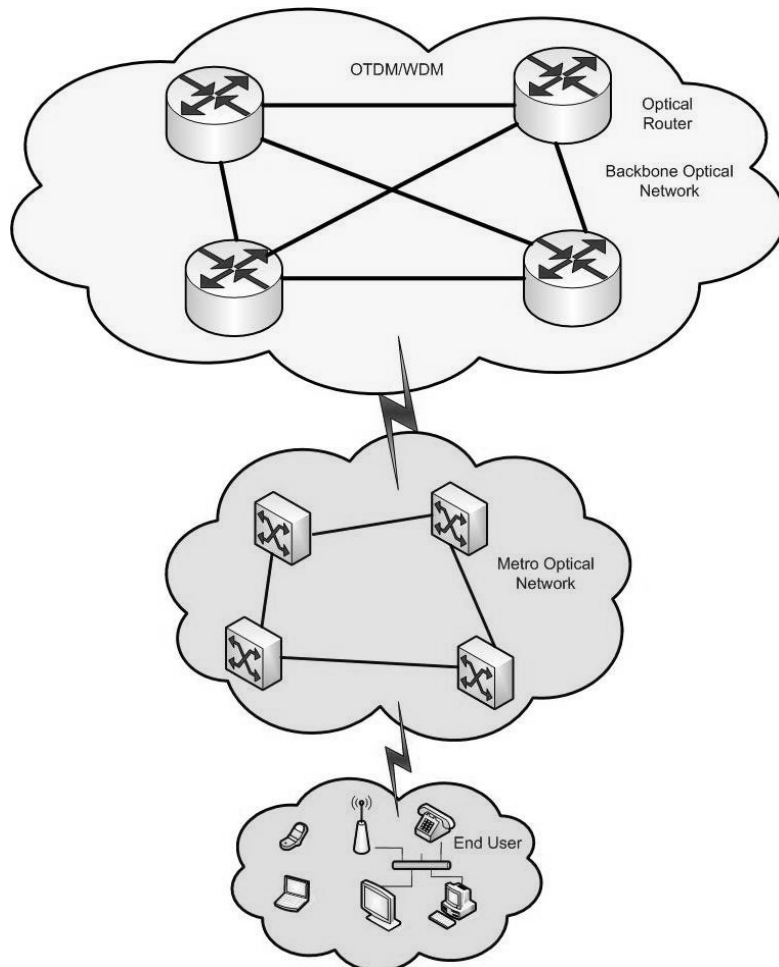
Σχήμα 2.10: Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου

Η TDM έχει εφαρμοστεί κατά κόρον στο κλασικό τηλεφωνικό δίκτυο, στο Ψηφιακό Δίκτυο Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών (ISDN), στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> γενιάς αλλά και σε δίκτυα κορμού όπως το ATM. Οι προοπτικές της συγκεκριμένης τεχνολογίας και η εφαρμογή της σε οπτικά συστήματα επικοινωνιών (OTDM) διαφαίνεται σαν μια μελλοντική εξέλιξη, αφού ως τώρα δεν μπορεί να ειπωθεί με καμία βεβαιότητα ότι η τεχνολογία αυτή έχει ωριμάσει ώστε να διατεθεί εμπορικά [31]. Η OTDM επιβάλλει την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης από τα 40 Gbps όπου και σήμερα είναι η τάση για τα εμπορικά φωτονικά δίκτυα σε ρυθμούς μετάδοσης πολλαπλάσιους. Η μετάβαση αυτή έχει προφανή πλεονεκτήματα αφού εξαλείφονται τα μη – γραμμικά φαινόμενα που υφίστανται στην WDM λόγω της αλληλεπίδρασης των πολλών διαφορετικών φασματικών καναλιών. Επιπλέον, είναι δυνατή η βέλτιστη εκμετάλλευση των ψηφιακών χαρακτηριστικών του οπτικού σήματος όπως η αμιγώς οπτική αναγέννηση, η δυνατότητα για μεταγωγή πακέτου (packet switching) και η οπτική κρυπτογράφηση (optical encryption) [32]. Από την άλλη, οι τεράστιοι ρυθμοί μετάδοσης, που μπορούν να είναι και της τάξης των πολλών εκατοντάδων Gbps ή ακόμη και Tbps, έχουν άλλα μειονεκτήματα με σημαντικότερα από αυτά την εντονότερη παρουσία της διασποράς, την διασυμβολική παρεμβολή και το συγχρονισμό των αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων. Οι δύο αυτές τεχνολογίες δεν μπορούν να συγκριθούν ανταγωνιστικά μιας και η ήδη υπάρχουσα και επικρατούσα τεχνολογία WDM θα είναι αυτή που σε συνδυασμό με την OTDM θα μπορέσουν να παρέχουν αποδοτικότερη εκμετάλλευση και διαχείριση του φάσματος.

### **2.3.1 Τοπολογίες Δικτύων OTDM**

Στα δίκτυα Πολυπλεξίας Διαίρεσης Χρόνου OTDM έχει επικρατήσει η τάση για ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση του ρυθμού μετάδοσης με ταυτόχρονη βέλτιστη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης. Αυτό με λίγα λόγια σημαίνει ότι πέρα από την αύξηση του μεταδιδόμενου ρυθμού στο δίκτυο κορμού, το οποίο συλλέγει πολλούς

ρυθμούς μετάδοσης από διάφορες πηγές που μπορούν να είναι και σε ρυθμούς που υποστηρίζονται από την ηλεκτρονική τεχνολογία, είναι επιτακτική η μετάβαση από τη χρονικά στατική πολυπλεξία στην χρονικά στατιστική πολυπλεξία. Με άλλα λόγια τα οπτικά συστήματα θα πρέπει να υιοθετήσουν τις σημερινές τεχνικές που εφαρμόζονται στα ηλεκτρονικά δίκτυα και που παρόλο που δεν μπορούν να υποστηρίξουν τους αναμενόμενους ρυθμούς μετάδοσης, είναι ικανά να αξιοποιούν με βέλτιστο τρόπο το εύρος ζώνης. Η εξέλιξη αυτή θα μπορούσε να υλοποιηθεί συνδυάζοντας WDM/OTDM με Οπτική Μεταγωγή Πακέτου (OPS). Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή αφορά το απώτερο μέλλον μιας και η OPS είναι ακόμη σε πρώιμα στάδια. Μια τελική μορφή του τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε επίπεδο WAN, MAN και LAN φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.11: Μελλοντικό Οπτικό Δίκτυο

Η τεχνολογία των δικτύων κορμού αυτών δανείζεται πολλά χαρακτηριστικά από τα σημερινά δίκτυα με τη διαφορά ότι για την αύξηση του ρυθμού πολλές από τις λειτουργίες είναι ανάγκη να μεταβούν στο οπτικό επίπεδο. Πρωτόκολλα όπως το MPLS που χρησιμοποιούνται και σήμερα για δρομολόγηση, φαίνεται να είναι τα επικρατέστερα ενώ τα υποστηριζόμενα πρωτόκολλα δεν διαφαίνεται ότι θα είναι διαφορετικά από τους σημερινά IP, ATM και Gigabit Ethernet. Η υιοθέτηση τεχνολογιών, όπως η FTTH, μπορούν να αλλάξουν το τοπίο στα δίκτυα πρόσβασης αφού πολλές νέες υπηρεσίες μπορούν να προσφερθούν που βασίζονται στην λογική του Triple – Play υψηλής ποιότητας (πχ. High Definition TV).

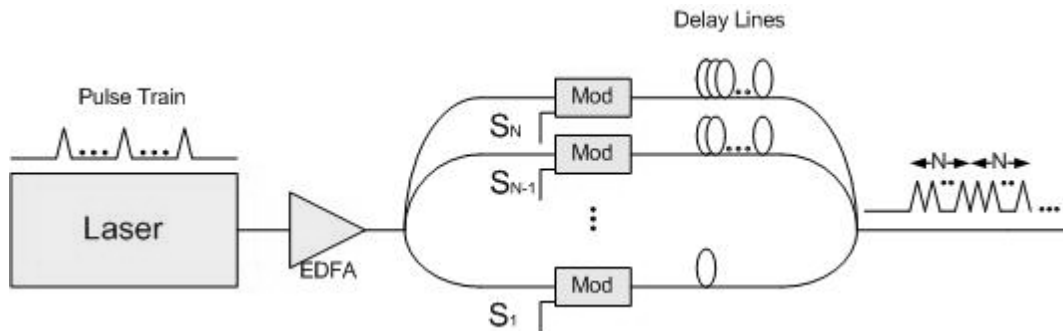
### **2.3.2 Διατάξεις Δικτύων OTDM**

Οι βασικές λειτουργίες που συμπεριλαμβάνονται στη λειτουργία ενός αμιγώς οπτικού δικτύου OTDM συνοψίζονται στην εκπομπή και λήψη των σημάτων, την πολυπλεξία και την αποπολυπλεξία, την ανάκτηση ρολογιού, την αναγέννηση, τη μεταγωγή, την προσωρινή αποθήκευση της οπτικής πληροφορίας και την υλοποίηση μιας στοιχειώδους ψηφιακής οπτικής λογικής. Παρακάτω παρατίθενται εν συντομία πειραματικές διατάξεις που έχουν ως τώρα παρουσιαστεί και επιτελούν τις προαναφερθείσες λειτουργίες

#### **2.3.2.1 Πομποί και Δέκτες OTDM**

Για την αποδοτική αξιοποίηση της τεχνολογίας OTDM είναι αναγκαίο να υπάρξουν αξιόπιστοι, ταχύτατοι, και πάνω από όλα χαμηλού κόστους πομποί και δέκτες. Οι απαιτούμενοι πομποί χρειάζεται να λειτουργούν είτε σε ρυθμούς 10 – 40 Gbps, είτε στα 100 Gbps και πλέον που είναι οι ρυθμοί του δικτύου κορμού και να παράγουν εξαιρετικά λεπτούς παλμούς. Παρ' όλα αυτά η κατασκευή laser σε ρυθμούς της τάξης των 100 GHz δεν είναι εύκολη υπόθεση και μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση συμπίεσης παλμών για τη δημιουργία *σολιτονίων*.

Μια σχετικά απλή υλοποίηση ενός OTDM πομπού είναι αυτή που βασίζεται σε γραμμές χρονικής καθυστέρησης (delay lines):



Σχήμα 2.12: Πομπός OTDM με γραμμές χρονικής καθυστέρησης

Σε αυτή την περίπτωση η πολυπλεξία είναι στατική και ακολουθείται η λογική της παρεμβολής ψηφίων/πακέτων (bit/packet interleaving). Το laser παράγει παλμούς στο βασικό ρυθμό του καναλιού, έστω  $B$ . Κάθε ένας από τους διαμορφωτές «γράφει» την πληροφορία πάνω στο εισερχόμενο ρεύμα των bits και στη συνέχεια κάθε κανάλι μεταδίδει την πληροφορία μέσα στη χρονοθυρίδα που ορίζεται από την χρονοκαθυστέρηση καταλήγοντας έτσι σε ένα σήμα ρυθμού  $N \cdot B$ .

Οι OTDM πομποί έχουν ως βασικές λειτουργίες τους την ανίχνευση του σήματος και την αποπολυπλεξία του. Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί για την αποπολυπλεξία του πολυπλεγμένου σήματος με αμιγώς οπτικό τρόπο, είτε με τη χρήση του συμβολομέτρου Sagnac (*Nonlinear Optical Loop Mirror*) είτε με συμβολόμετρα Mach – Zehnder, είτε με τη χρήση μη – γραμμικού στοιχείου όπως για παράδειγμα ένας SOA. Απαραίτητη ωστόσο για την τελική αποπολυπλεξία του σήματος είναι πάνω από όλα η ανάκτηση του ρολογιού στο ρυθμό μετάδοσης με σκοπό το συγχρονισμό της λειτουργίας της όλης διάταξης.

### 2.3.2.2 Διατάξεις Ανάκτησης Ρολογιού

Μια από τις σημαντικότερες διεργασίες στα οπτικά δίκτυα OTDM είναι η ανάκτηση του ρολογιού (clock recovery) στο βασικό ρυθμό με σκοπό την αποπολυπλεξία των δεδομένων από τα διαφορετικά

κανάλια αλλά και τον συγχρονισμό. Ενδεικτικά έχει δειχθεί ανάκτηση ρολογιού σε πολύ υψηλούς ρυθμούς [33], [34] με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

#### **2.3.2.3 Αμιγώς Οπτικοί Αναγεννητές**

Από την πληθώρα των διατάξεων OTDM δε μπορούν να παραληφθούν οι Αμιγώς Οπτικοί Αναγεννητές (All Optical Regenerators). Οι ανάγκες που προσπαθούν να καλύψουν τα οπτικά δίκτυα περιλαμβάνουν και τη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος πρέπει να είναι όσο το δυνατό καλύτερη και σε αυτό συμβάλλουν οι Αναγεννητές που Επανενισχύουν (Reamplify), Επανασυγχρονίζουν (Retime) και Αναμορφώνουν (Reshape) το μεταδιδόμενο OTDM σήμα [35].

#### **2.3.2.4 Διατάξεις Αμιγώς Οπτικής Ψηφιακής Λογικής**

Τα τελευταία χρόνια έχουν δειχθεί πολλά οπτικά κυκλώματα τα οποία μπορούν να υλοποιηθούν με αμιγώς οπτικό τρόπο Ψηφιακή Λογική. Τα κυκλώματα αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε κόμβους οπτικών δικτύων (OXC) όπου χρειάζεται επεξεργασία του εισερχόμενου πακέτου. Η πλέον συνηθισμένη τεχνολογία που ακολουθείται βασίζεται σε SOA [36] και με βάση αυτούς έχουν δειχθεί πειραματικά πολλά είδη οπτικών πυλών.

#### **2.3.2.5 Διατάξεις Ενταμιευτών**

Μια ακόμη καθοριστικής σημασίας για την εξέλιξη των οπτικών δικτύων τεχνολογία είναι αυτή των **Οπτικών Ενταμιευτών (Optical Buffers)**. Οι ενταμιευτές είναι εξαιρετικής σημασίας γιατί αποτελούν ένα πολύ σημαντικό τμήμα της τεχνολογίας των Οπτικών Δρομολογητών Μεταγωγής Πακέτου. Ωστόσο η Οπτική Τεχνολογία παρά το γεγονός ότι έχει κάνει άλματα σε άλλους τομείς δεν έχει γίνει



ακόμη πραγματικότητα η δημιουργία μιας αξιόπιστης και αποδοτικής λύσης για την αποθήκευση δεδομένων με οπτικό τρόπο. Οι τελευταίες εξελίξεις οδηγούν προς την χρήση υλικών τα οποία μπορούν να ελαττώσουν σε πολύ μεγάλο βαθμό των ταχύτητα ομάδος του φωτός [37] και να εισάγουν μεγάλη καθυστέρηση.

#### **2.3.2.6 Διακόπτες Οπτικής Μεταγωγής**

Δομικό και αναπόσπαστο στοιχείο των οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτου είναι και οι αμιγώς οπτικοί διακόπτες (switches). Οι διατάξεις αυτές έχουν την ικανότητα να επιλέγουν ανάμεσα σε δύο διαφορετικές καταστάσεις στις οποίες μπορούν να βρίσκονται και έτσι μπορούν να δομήσουν ένα μεγαλύτερο μεταγωγέα  $N \times N$  ακολουθώντας κλιμακωτή αρχιτεκτονική.

#### **2.4 Συστήματα Πολυπλεξίας Υπο-φέροντος (SCM)**

Η *Πολυπλεξία Υπο-φέροντος (SCM)* είναι μια τεχνική πολυπλεξίας του εύρους ζώνης, γνωστή και εφαρμοσμένη εδώ και αρκετά χρόνια έχοντας τις ρίζες της στην μικροκυματική τεχνολογία. Η τεχνολογία αυτή προϋποθέτει από τη μεριά του χρήστη ότι οι αναμενόμενοι ρυθμοί μετάδοσης δεν είναι μεγάλοι ενώ τα μεταδιδόμενα κανάλια είναι πολλά. Η βασική αρχή της τεχνολογίας αυτής είναι ότι τα διάφορα Υπο-φέροντα (SubCarriers) που βρίσκονται σε μικροκυματικές συχνότητες διαμορφώνονται και στη συνέχεια διέρχονται από ένα μικροκυματικό συνδυαστή (combiner) και δημιουργείται ένα μικροκυματικό σήμα. Το σήμα αυτό στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει μια οπτική πηγή (πχ. ένα laser) και στο υπόλοιπο τμήμα του δικτύου η μετάδοση γίνεται σε οπτικό καθεστώς. Η τεχνολογία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον σε δίκτυα μετάδοσης ψηφιακής και αναλογικής καλωδιακής τηλεόρασης (CATV). Ιδιαίτερα σε συνδυασμό με την τεχνολογία WDM έχει δειχθεί

η μεταφορά 10000 ((32 οπτικά κανάλια)x(310 μικροκυματικά)) καναλιών των 20 Mbps το καθένα [38].

## **2.5 Συστήματα Πολυπλεξίας Διαίρεσης Κώδικα (CDM)**

Μια νέα τεχνική πολυπλεξίας έχει κάνει την εμφάνιση της τα τελευταία χρόνια, η **Πολυπλεξία Διαίρεσης Κώδικα (Code Division Multiplexing)**. Η νέα αυτή τεχνολογία εμφανίστηκε κατά κύριο λόγο στα ασύρματα συστήματα με σκοπό την καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος. Στις τεχνικές πολυπλεξίας όπως οι WDM και OTDM, κάθε κανάλι/χρονοθυρίδα είναι δεσμευμένο για κάθε χρήστη ανεξάρτητα από το αν μεταδίδει σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ή όχι. Στην περίπτωση της CDMA (CDM Access όπως συνήθως χρησιμοποιείται ο όρος για να δοθεί έμφαση στην πρόσβαση) κάθε χρήστης κάνει χρήση όλου του διαθέσιμου φάσματος σε κάθε χρονική στιγμή. Αυτό μπορεί να είναι εφικτό με την Τεχνική Εξάπλωσης Φάσματος (Spread – Spectrum Technique). Σύμφωνα με αυτή κάθε χρήστης διαμορφώνει το σήμα του με μια ακολουθία που είναι μοναδική για αυτόν, τον λεγόμενο κώδικα. Με αυτή την ακολουθία εκτελείται μια λογική πράξη μεταξύ αυτής και του προς μετάδοση σήματος που προκαλεί εξάπλωση του φάσματος σε όλο το διατιθέμενο εύρος ζώνης. Από τη μεριά του δέκτη αν είναι γνωστή η ακολουθία bits του πομπού τότε ο πολλαπλασιασμός της με το επιθυμητό εισερχόμενο σήμα θα προκαλέσει συμπίεση του φάσματος στο αρχικό ενώ με οποιαδήποτε άλλη ακολουθία το σήμα που θα προκύψει δεν θα αποκωδικοποιηθεί. Η επίδοση που εμφανίζουν τα οπτικά πειραματικά συστήματα CDMA είναι χαμηλή από πλευράς BER κάτι που ωστόσο μπορεί να βελτιωθεί ως ένα βαθμό με τη χρήση τεχνικών Forward Error Correction.

## **2.6 Αναφορές 2<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**

- [1] G. P. Agrawal, “*Fiber-Optic Communication Systems*”, 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley & Sons Inc., NY, 2002
- [2] E. A. De Souza, M. C. Nuss, W. H. Knox, and D. A. B. Miller, “*Wavelength-division multiplexing with femtosecond pulses*”, *Electronics Letters*, vol. 20, no. 16, pp. 1166–1168, 1995
- [3] L. Boivin, M. Wegmueller, M. C. Nuss and W. H. Knox, “*110 Channels 2.35 Gb/s from a Single Femtosecond Laser*”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, No. 4, pp. 466-468, Apr. 1999
- [4] N. Pleros, C. Bintjas, G. Theophilopoulos, M. Kalyvas, S. Sygletos and H. Avramopoulos, “*Power equalization with optical feedback in a 52 wavelength SOA ring laser source*”, presented at the Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2002, Anaheim, CA, USA, WJ2, pp. 243-245
- [5] Ö. Boyraz, J. Kim, M. N. Islam, F. Copping, and B. Jalali, “*10 Gb/s Multiple Wavelength, Coherent Short Pulse Source Based on Spectral Carving of Supercontinuum Generated in Fibers*”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18, No. 12, pp. 2167-2175, Dec. 2000
- [6] P. Bakopoulos et al., “*Multi-Wavelength Laser Source for Dense Wavelength Division Multiplexing Networks*”, presented at the Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2007, Anaheim, CA
- [7] G. P. Agrawal, “*Nonlinear Fiber Optics*”, 3<sup>rd</sup> Ed., Academic Press Inc., CA, 2001
- [8] K. Fukuchi et al., “*10.92 Tbps (273x40 Gbps) triple-band/ultra-dense WDM optical – repeated transmission experiment*”, *Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2001*, Anaheim, CA, USA, PD24

- [9] B. Zhu et al., “*Transmission of 3.2 Tb/s (80×42.7 Gb/s) over 5200 Km of Ultrawave™ fiber with 100-Km dispersion-managed spans using RZ-DPSK format*”, 28th European Conference on Optical Communication (ECOC) 2002, Copenhagen, Denmark, PD4.2
- [10] G. Varella et al., “*3.65 Tbit/s (365×11.6 Gbit/s) transmission experiment over 6850 km using 22.2 GHz channel spacing in NRZ format*”, 27th European Conference on Optical Communication (ECOC) 2001, Amsterdam, The Netherlands, vol. 6, pp. 14-15
- [11] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, “*Optical networks: A practical perspective*”, Academic Press Inc., NY, 2nd Ed., 2002
- [12] S. Binetti, A. Bragheri, E. Iannone, and F. Bentivoglio, “*Mesh and Multi-Ring Optical Networks for Long-Haul Applications*”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 12, pp. 1677-1684, Dec.2000
- [13] W. Anderson et al., “*The MONET project-a final report*”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 12, 1988-2009, Dec. 2000
- [14] S. V. Kartalopoulos, “*Introduction to DWDM Technology: Data in a rainbow*”, Wiley-IEEE Press, Inc., 2000
- [15] Goodman, M.S, “*The LAMBDANET multiwavelength network: architecture, applications, and demonstration*”, IEEE Journal of Selected Areas in Communications Vol. 8, No. 6, pp. 995-1004, 1990
- [16] S. S. Wagner, H. Kobrinski, T. J. Robe, H. L. Lemberg, and L. S. Smoot, Electronics Letters 24, 344, 1988
- [17] I. P. Kaminow and T. Li, “*Optical fiber telecommunications IV A Components*”, Academic Press Inc., NY, 2002
- [18] C. Bintjas et al., “*Clock Recovery Circuit for Optical Packets*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 14, No. 9, pp. 1363-1365, Sep. 2002

- [19] G. T. Kanellos et al., “40 Gb/s 2R Burst Mode Receiver with a single integrated SOA-MZI switch”, OSA Optics Express
- [20] N. Pleros et al., “Multiwavelength and Power Equalized SOA Laser Sources” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 14, No. 5, pp. 693-695, May 2002
- [21] G. P. Agrawal, “Applications of Nonlinear Fiber Optics”, Academic Press Inc., CA, 2001
- [22] R. Kashyap, “Fiber Bragg Gratings”, Academic Press Inc., CA, 1999
- [23] P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson, “Erbium – Doped Fiber Amplifiers, Fundamentals and Technology”, Academic Press Inc., CA, 1999
- [24] K. M. Sivalingam and S. Subramaniam, “Optical WDM Networks Principles and Practice”, Kluwer Academic Publishers, NY, 2000
- [25] B. Ramamurthy, and B. Mukherjee, “Wavelength Conversion in WDM Networking”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 16, No. 7, pp. 1061-1073, Sep. 1998
- [26] S. J. B. Yoo, “Wavelength Conversion Technologies for WDM Network Applications”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 14, No. 6, pp. 955-966, June 1996
- [27] S. L. Lee et al., “Monolithically Integrated Multiwavelength Sampled Grating DBR Lasers for Dense WDM Applications”, IEEE Journal of Selected topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 1, pp. 197-206, Jan/Feb 2000
- [28] T.-P. Lee, C. E. Zah, and R. Bhat, “Multiwavelength DFB laser array transmitters for ONTC reconfigurable optical network testbed”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 14, No. 6, pp. 967-976, June 1996

- [29] M. Zirngibl, C. H. Joyner, C. R. Doerr, L. W. Stulz, and H. M. Presby, “*An 18 Channel Multifrequency Laser*”, IEEE Photonics Technology Letters Vol. 8, No. 7, pp. 870-872, Jul. 1996
- [30] F. Tong, “*Multiwavelength Receivers for WDM Systems*”, IEEE Communications Magazine, Vol. 36, No. 12, pp. 42-49, Dec. 1998
- [31] M. J. O’ Mahony et al., “*Future Optical Networks*”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 24, No. 12, pp. 4684-4696, Dec. 2006
- [32] V. W. S. Chan, K. L. Hall, E. Modiano and K. A. Rauschenbach, “*Architectures and Technologies for High-Speed Optical Data Networks*”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, No. 12, pp. 2146-2168, Dec. 1998
- [33] J. P. Turkiewicz et al., “*Clock recovery and demultiplexing performance of 160 Gb/s OTDM field experiments*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, pp. 1555-1557 (2004)
- [34] L. Stampoulidis et al. , “*40 Gb/s Fast-Locking All-Optical Packet Clock Recovery*” presented at OFC 2005, Tech. Dig. OThE2, Anaheim, USA, 2005
- [35] D. Petrantonakis et al., “*A 40 Gb/s 3R Burst Mode Receiver with 4 integrated MZI switches*”, OFC 2006, Post Deadline Session PDP25, Anaheim, USA, 2006
- [36] K. E. Stubkjaer, “*Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing*,” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 6, pp. 1428–1435, Nov. /Dec. 2000
- [37] C. J. Chang-Hasnain and S. L. Chuang, “*Slow and Fast Light in Semiconductor Quantum-Well and Quantum-Dot Devices*”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 24, No. 12, pp. 4642-4654, Dec. 2006

- [38] M. Ogawara et al., “*Demonstration of a 20-Mbit/s 10 000-Channel WDM/SCM Broadcast-and-Select System*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No. 3, pp. 350-352, Mar. 2000





# **Κεφάλαιο 3**

## **Πολυκυματικοί Πομποί για Δίκτυα DWDM**

### 3.1 Εισαγωγή

Η πραγματικότητα των οπτικών δικτύων WDM δρομολόγησης μήκους κύματος που αναμένεται ότι στο κοντινό μέλλον θα αποτελέσει τη βασική τεχνολογία Δικτύων Κορμού, Μητροπολιτικών δικτύων αλλά και η σύγκλιση του Δικτύου Πρόσβασης με την οπτική τεχνολογία δημιουργεί ανάγκη για εύχρηστες, μαζικά παραγόμενες, οικονομικά συμφέρουσες και περιορισμένες σε όγκο οπτικές διατάξεις. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των προαναφερθέντων τύπων δικτύων είναι η υιοθέτηση ενός αριθμού μηκών κύματος – καναλιών που ο αριθμός τους μπορεί να κυμαίνεται από λίγα (5-10) εως μερικές εκατοντάδες. Για την οικονομικά προσιτή λειτουργία των δικτύων αυτών δημιουργείται η ανάγκη για την δημιουργία και την εύκολη διαθεσιμότητα πολλών καναλιών μήκους κύματος. Μέχρι πρόσφατα αυτό ήταν εφικτό με την ολοκλήρωση πολλών laser που ωστόσο παρήγαγε έναν περιορισμένο αριθμό μηκών κύματος (της τάξης των 10-20). Η υιοθέτηση της λογικής της ολοκλήρωσης πολλών laser σε μια μονάδα, παρά το ότι κατέστη δυνατή από την ήδη γνωστή τεχνολογία που ακολουθείται σε ημιαγώγιμες διατάξεις, είναι περιορισμένη όσον αφορά τη δυνατότητα για περισσότερα μήκη κύματος και πυκνότερη οριοθέτηση των φασματικών καναλιών. Με τις πηγές αυτές η φασματική πυκνότητα είναι σχετικά αραιή και μπορούμε να κάνουμε λόγο μόνο για **Coarse WDM** και όχι **Dense WDM**. Έτσι από νωρίς προέκυψε η ανάγκη για μια περισσότερο αποδοτική τεχνολογία που να παρέχει μεγαλύτερο αριθμό καναλιών, περισσότερη σταθερότητα, ομοιόμορφη συμπεριφορά, ευκολία στη κατασκευή και χαμηλό κόστος. Επιπλέον, η ITU έχει θεσπίσει ένα πλέγμα καναλιών (ITU grid) το οποίο διαιρεί το φάσμα της περιοχής των 1550 nm σε 3 φασματικές ζώνες (μπάντες) τις S,C, και L. Για αυτές τις ζώνες έχουν οριστεί ακριβώς οι κεντρικές συχνότητες – μήκη κύματος με αποστάσεις μεταξύ τους στα 50 και στα 100 GHz (Παράρτημα Α). Έτσι μια αξιόπιστη πηγή θα πρέπει εκτός από όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά να μπορεί εύκολα να συντονιστεί στο πλέγμα της ITU για να είναι συμβατή με όλες τις άλλες πηγές που

μεταδίδουν. Στην συνέχεια θα ακολουθηθεί μια περιγραφή των ήδη υπάρχοντων *Πολυκάναλων Lasers (Multichannel Lasers)*, και θα παρουσιαστεί η ιδέα των *Πολυκυματικών Πηγών (Multiwavelength Sources)* ενώ παράλληλα θα εξηγηθεί η λειτουργία μερικών από αυτές.

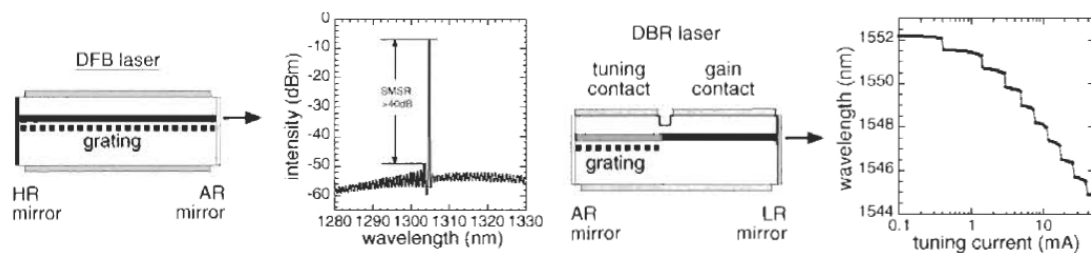
### 3.2 Lasers Πολλαπλών Καναλιών

Η πρώτη διάταξη που επινοήθηκε για την μαζική παραγωγή πολλών μηκών κύματος και η πλέον απλούστερη σαν ιδέα είναι τα Πολυκάναλα Lasers. Σε αυτή την υλοποίηση σε μια ημιαγωγίμη επιφάνεια είναι δυνατόν να ολοκληρωθούν πολλά laser, τα καθένα από τα οποία παράγει ένα διαφορετικό μήκος κύματος. Η ιδέα αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι είναι σχετικά απλή, από την άλλη όμως ανεβάζει κατά πολύ το κόστος της διάταξης. Ο τύπος των laser που συνήθως χρησιμοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι είτε *DFB (Distributed FeedBack Laser)* είτε *DBR (Distributed Bragg Reflector Laser)*. Ωστόσο τελευταία έχει δειχθεί και μια άλλη υλοποίηση που βασίζεται σε lasers τύπου *VCSEL (Vertical Cavity Surface – Emitting Laser)*. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα που μπορεί να εμφανιστεί σε αυτού του τύπου τις πηγές είναι το ότι λόγω της ημιαγωγίμης κατασκευής τους εκτός από τα lasers μπορούν να ολοκληρωθούν και άλλες διατάξεις μαζί όπως για παράδειγμα *Διαμορφωτές Ηλεκτρο-Απορρόφησης (Electro - Absorption Modulators)*. Στη συνέχεια παρατίθενται εν συντομία η λειτουργία αυτού του τύπου των lasers και αναλύεται η λειτουργία διαφόρων Πολυσυχνοτικών lasers.

#### 3.2.1 Lasers τύπου DFB/DBR

Τα lasers *Κατανεμημένης Ανάδρασης (DFB)* μπορούν να οριστούν σαν τύπος ημιαγωγίμων laser των οποίων η κοιλότητα αποτελείται από μια περιοδική δομή η οποία περιέχει στο μέσον της ένα μετατοπιστή φάσης και λειτουργεί σαν ένας κατανεμημένος ανακλαστήρας στο εύρος ζώνης της επιθυμητής εκπομπής

συμπεριλαμβάνοντας επιπλέον και ένα στοιχείο κέρδους. Τα laser αυτά μπορούν να συντονιστούν σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος συχνοτήτων που είναι της τάξης των αρκετών νανομέτρων. Τα lasers **Κατανεμημένου Ανακλαστήρα Bragg (DBR)** είναι lasers των οποίων η κοιλότητα κατασκευάζεται με τουλάχιστον ένα κατανεμημένο ανακλαστήρα Bragg εξωτερικά του στοιχείου κέρδους. Η διαφορά τους με τα DFB είναι ότι στα DFB lasers το στοιχείο που προκαλεί την ανάδραση είναι ενιαίο και κατανεμημένο σε μια διάταξη και σε όλο το μήκος της κοιλότητας μαζί με το στοιχείο κέρδους.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση κοιλότητας laser DFB και DBR [2]

Στα DFB lasers η δομή περιλαμβάνει ένα κατανεμημένο φράγμα περίθλασης Bragg έτσι ώστε η μεταβολή μέσα σε αυτό να είναι περιοδική [3]. Με αυτόν τον τρόπο η ανάδραση της ενέργειας είναι περιοδική με βήμα έστω  $\Lambda$ . Αν η περίοδος κυμάτωσης  $\Lambda$  είναι ίση με:

$$\Lambda = \frac{l\lambda_B}{2n_e} \quad (3.1)$$

όπου  $l$  ακέραιος που εκφράζει την τάξη του φράγματος μεταγωγής,  $\lambda_B$  το μήκος κύματος Bragg και  $n_e$  ο δείκτης διάθλασης του μέσου τότε μόνο ο κοντινότερος ρυθμός στο  $\lambda_B$  ταλαντώνεται στην κοιλότητα και όλοι οι άλλοι αποσβένονται. Πρέπει να τονιστεί ότι η διαφορά αυτού του τύπου των lasers με τα υπόλοιπα είναι ότι η σύζευξη της ενεργού περιοχής με μια συντονιζόμενη δομή γίνεται στο εσωτερικό της κοιλότητας και όχι εξωτερικά. Παρόμοια λειτουργούν και τα DBR με τη διαφορά ότι το φράγμα μεταγωγής δεν καλύπτει την ενεργό περιοχή αλλά η απολαβή είναι έξω από το φράγμα περίθλασης όπως στο σχήμα. Η συνάρτηση μεταφοράς αυτού του τύπου των laser βρίσκεται

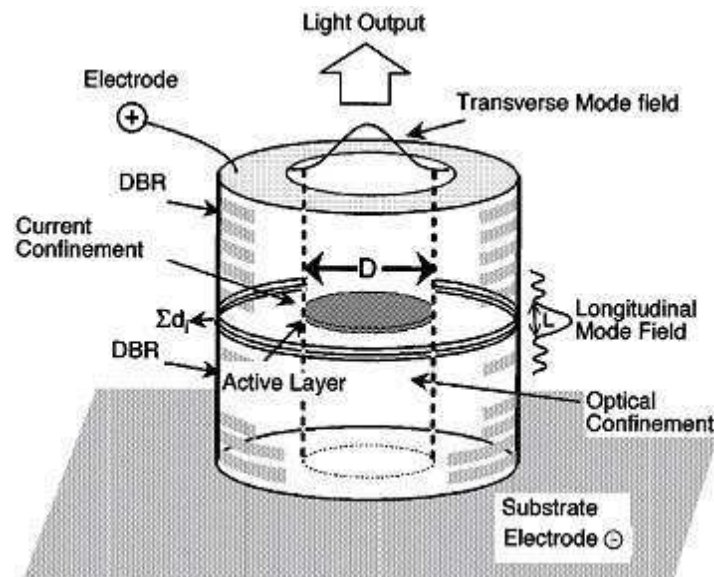
μετασχηματίζοντας κατά Fourier την κρουστική απόκριση του laser και δίνει:

$$T(f) = \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} \quad (3.2)$$

όπου  $\tau$  ο χρόνος για μια πλήρη ταλάντωση στην κοιλότητα (round-trip-time).

### 3.2.2 Lasers τύπου VCSEL

Ένας άλλος τύπος laser που φαίνεται ότι μπορεί να αποτελέσει σημαντική τεχνολογία για πολυσυχνοτικές συστοιχίες laser είναι ο **VCSEL** (*Vertical Cavity Surface - Emitting Laser*) [4]. Το χαρακτηριστικό των laser αυτών είναι ότι η ακτινοβολία εκπέμπεται κάθετα στην ημιαγώγιμη περιοχή του. Ένα τέτοιου τύπου laser αποτελείται από δύο κατανεμημένες ανάδρασης κάτοπτρα Bragg τα οποία είναι αντίθετων προσμίξεων (n και p τύπου). Στο ενδιάμεσο αυτών βρίσκεται η περιοχή του κέρδους που στις περισσότερες περιπτώσεις τροφοδοτείται ηλεκτρικά.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα μιας απλουστευμένης δομής VCSEL [4]

Τα lasers αυτά θεωρούνται ιδανικά για διάφορες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές και ιδιαίτερα για Δίκτυα Gigabit Ethernet. Ένα μειονέκτημα

που ωστόσο εμφανίζουν είναι η σχετικά μικρή ισχύς εξόδου που μπορούν να αποδώσουν.

### **3.2.3 Υλοποιήσεις Συστοιχιών Πολυκαναλικών Laser**

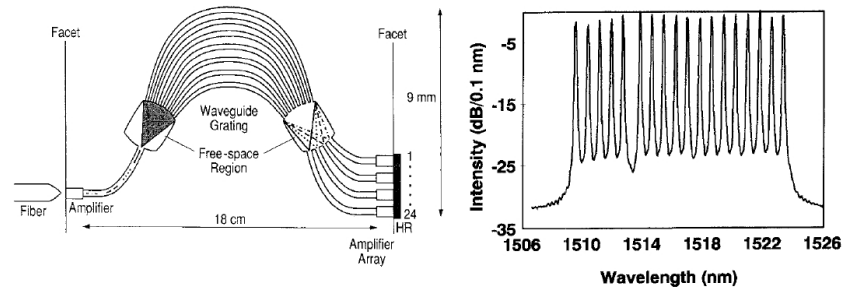
Με βάση τους παραπάνω τύπους laser έχουν δειχθεί πειραματικά, ενώ κάποια έχουν κατασκευαστεί για εμπορικά διάθεση, συστοιχίες τέτοιων laser για WDM εφαρμογές.

Σε μια κλασική πλέον τεχνολογία οι έξοδοι πολλών DFB/DBR lasers, που μπορούν να συντονίζονται ανεξάρτητα μέσω διαφορετικών κατανεμημένων κατόπτρων Bragg με διαφορετικές περιόδους, συνδυάζονται μέσω παθητικών κυματοδηγών [5]–[8]. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να παραχθεί μια ακολουθία μηκών κύματος η οποία παρόλα αυτά δεν μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλη (της τάξης των 20).

Η τεχνολογία των VCSEL μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πολυκαναλικών laser. Ένα από τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν είναι η ικανότητα τους να μπορούν να σχηματίσουν δισδιάστατες συστοιχίες δίνοντας έτσι αρκετά μεγάλους αριθμούς (εως και 1000) από ξεχωριστά κανάλια τα οποία μπορούν να βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους με ικανοποιητική ισχύ εξόδου [4], [9], [10].

### **3.2.4 Πολυσυχνοτικά Laser**

Εκτός από την παραπάνω κατηγορία των lasers μια άλλη τεχνική που έχει υιοθετηθεί για αυτού του τύπου τις διατάξεις βασίζεται στην τοποθέτηση ενός AWG μέσα στην κοιλότητα του laser. Τα lasers αυτά ονομάζονται *Πολυσυχνοτικά Lasers (Multifrequency Lasers)* και η βασική τους διαφορά από τα υπόλοιπα πολυκαναλικά laser είναι ότι όλα τα κανάλια παράγονται στην ίδια κοιλότητα Fabry – Perot.



Σχήμα 3.3: Πολυσυχνотικό laser με WGR και το αντίστοιχο φάσμα [11]

Σε αυτή την υλοποίηση η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι 103 GHz ( $\sim 0.8$  nm) που καθένα από αυτά δίνει κατά μέσο όρο ισχύ εξόδου της τάξης των -14.6 dBm. Κατά τη εκτέλεση πειράματος μετάδοσης κάθε κανάλι διαμορφώθηκε στα 1.24 Gbps δίνοντας συνολικό ρυθμό μετάδοσης πάνω από 20 Gbps.

### 3.2.5 Συντονιζόμενα Laser

Με βάση τους παραπάνω τύπους laser έχουν κατασκευαστεί διατάξεις laser οι οποίες έχουν την ικανότητα συντονισμού σε ένα μόνο κανάλι το οποίο μπορεί να κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ο συντονισμός σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα γίνεται είτε με τον μηχανικό έλεγχο του μήκους της κοιλότητας, είτε με τον έλεγχο της θερμοκρασίας αυτής.

Τα πολυκαναλικά laser είναι οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται περισσότερο από όλες στα υπάρχοντα συστήματα WDM ως τώρα. Ωστόσο στο μέλλον αναμένεται η αντικατάστασή τους με πολυκυματικές πηγές. Οι λόγοι που υπαγορεύουν μια τέτοια αλλαγή βασίζονται σε διάφορους παράγοντες. Πρώτα από όλα, τα πολυκαναλικά laser απαιτούν ξεχωριστές τροφοδοσίες για κάθε πηγή κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Επιπλέον, η κατασκευή τους είναι ιδιαίτερα απαιτητική αυξάνοντας κατά πολύ το κόστος ανά μεταδιδόμενο κανάλι. Επιπρόσθετα, με την υιοθέτηση της τεχνολογίας DWDM προκύπτει η απαίτηση για περισσότερα κανάλια σε ένα συγκεκριμένο φασματικό εύρος που θα πρέπει να έχουν απόσταση

μεταξύ τους 100 ή ακόμη και 50 GHz. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι οι απαιτήσεις για περισσότερα κανάλια, που ο αριθμός τους πλέον δεν είναι συγκρίσιμος με αυτόν των πολυκαναλικών laser, είναι αυξημένες. Έτσι οι πολυκυματικές πηγές προσφέρουν μια εναλλακτική λύση στο πρόβλημα αυτό αφού με ένα laser ως είσοδο μπορούν να παράγουν πολλές συχνότητες στην έξοδο τους. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πηγών αυτών είναι η δραματική μείωση του κόστους ανά κανάλι που παρέχουν σε συνδυασμό με τη συνοχή (coherence) μεταξύ των καναλιών. Μέχρι σήμερα κατά τη μετάδοση από τη μεριά του πομπού γινόταν διαμόρφωση της έντασης και από τη μεριά του δέκτη είχαμε άμεση αποδιαμόρφωση (μέθοδος IM/DD). Η παραγωγή πηγών με συνοχή επιτρέπουν τη χρήση τεχνικών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που είναι ήδη γνωστές από άλλου τύπου τηλεπικοινωνιακά συστήματα, αυξάνοντας έτσι τη φασματική απόδοση. Σε αντίθεση με τα παραπάνω οι πολυκυματικές πηγές δημιουργούν πρόσθετες απαιτήσεις για σταθερότητα των καναλιών, ενώ ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων αφού τα μη – γραμμικά φαινόμενα μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

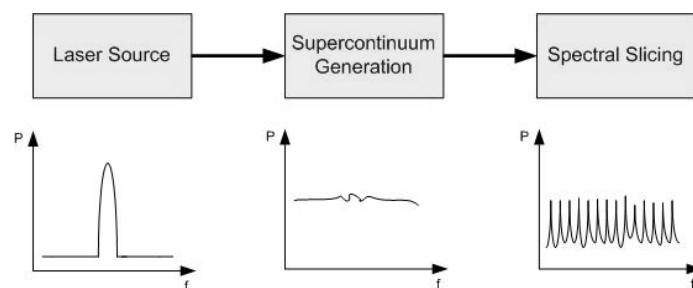
### **3.3 Πολυκυματικές Πηγές**

Η ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος ζώνης, που οδήγησε στην ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση για laser που να παράγουν λεπτούς παλμούς σε διάφορες συχνότητες, οδήγησε στην προσπάθεια για αποδοτικότερη και οικονομικότερη κατασκευή πηγών οπτικών επικοινωνιών. Συμβατικά, τα Συστήματα WDM χρησιμοποιούν ένα ξεχωριστό laser για κάθε κανάλι. Οι Πολυκυματικές Πηγές αποτελούν σημαντική συνισταμένη προς την κατεύθυνση αυτή αφού μπορούν να παράγουν ένα μεγάλο εύρος από μήκη κύματος με απλό και οικονομικό τρόπο. Οι πηγές αυτές θα πρέπει να ικανοποιούν κάποιες συγκεκριμένες προϋποθέσεις έτσι ώστε να θεωρείται συμφέρουσα και αποδοτική η τεχνολογική χρήση τους. Μερικές από αυτές είναι:



1. Μεγάλος αριθμός καναλιών ικανός για DWDM εφαρμογές
2. Σταθερή φασματική απόσταση μεταξύ των καναλιών
3. Σχετικά υψηλή ισχύς εξόδου σε κάθε κανάλι
4. Ικανότητα συντονισμού στο πλέγμα της ITU
5. Μικρές αποκλίσεις μεταξύ της ισχύος των καναλιών (<3dB)
6. Συνοχή φάσης και σταθερότητα
7. Χαμηλό κόστος – Ευκολία κατασκευής

Πειραματικά έχουν υποδειχθεί πολλές διαφορετικές παραλλαγές για την τεχνολογία των Πολυκυματικών Πηγών. Η γενική πρακτική της κατασκευής των Πολυκυματικών πηγών είναι η διεύρυνση του φάσματος που προέρχεται από ένα laser που παράγει πολύ λεπτούς παλμούς (σε πολλές περιπτώσεις είναι της τάξης των femtosecond) με διάφορες τεχνικές και στη συνέχεια η διαίρεση του ευρύτατου φάσματος αυτού στα επιμέρους WDM κανάλια. Στην ορολογία της Φωτονικής τεχνολογίας το ευρύ φάσμα που προορίζεται για **Φασματικό Διαχωρισμό** (*Spectral Slicing*) ονομάζεται **Supercontinuum** και συνήθως παράγεται από μη-γραμμικά φαινόμενα που απαντώνται σε οπτικές ίνες.



Σχήμα 3.4: Γενική δομή Πολυκυματικής Πηγής

Παρ' όλα αυτά, η παραπάνω ακολουθία διατάξεων δεν είναι και η μοναδική με την οποία μπορούν να σχεδιαστούν Πολυκυματικές Πηγές [12], αν και είναι η πλέον συνηθισμένη. Στη συνέχεια εξετάζονται διάφορες μεθοδολογίες για πολυκυματικές πηγές.

### 3.3.1 Πηγές Αντλησης Οπτικής Ισχύος

Εξαιρετικά σημαντικό ρόλο για την τεχνολογία των Πολυκυματικών Πηγών είναι τα laser που παρέχουν τους αρχικούς παλμούς εισόδου. Οι παλμοί αυτοί είναι εξαιρετικά λεπτοί και αυτό οφείλεται στο ότι όσο λεπτότεροι είναι οι παλμοί τόσο ευρύτερο είναι το φάσμα τους. Σε πολλές από τις υλοποιήσεις που έχουν δειχθεί, στις οποίες δεν υπάρχει υψηλή απαίτηση για μεγάλο αριθμό καναλιών, το φάσμα ενός παλμού της τάξης των femtosecond είναι αρκετό. Μάλιστα έχει δειχθεί ότι με τη χρήση παλμών εύρους 85 fs, με αντίστοιχο φάσμα 3.7 GHz, 16 κανάλια στα 82 Mbps το καθένα είναι εφικτά χωρίς μάλιστα τη δημιουργία Supercontinuum [13]. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή έχουν προσαρμοστεί και διαμορφωτές *MQW (Multiple Quantum Well)* σε ολοκληρωμένη μορφή. Σε άλλες περιπτώσεις οι παλμοί έχουν εύρος που ποικίλει από 100 ως 330 fs. Ωστόσο οι πηγές παλμών fs είναι εξαιρετικά ακριβές και δυσεύρετες ενώ επιπλέον αυτές καθεαυτές δεν μπορούν να παρέχουν τόσο ευρύ φάσμα που να είναι αρκετό για DWDM εφαρμογές. Για το λόγο αυτό προτιμώνται laser παλμών της τάξης των picosecond σε συνδυασμό με τη δημιουργία Supercontinuum. Επιπλέον, υψίστης σημασίας είναι και ο *ρυθμός επανάληψης (repetition rate)* του laser για το συγχρονισμό της όλης διάταξης αφού όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης μπορούν να υποστηρίξουν τα επιμέρους κανάλια.

Επιπρόσθετα, εκτός από femtosecond πηγές laser, η επιθυμητή οπτική ισχύς μπορεί να εισαχθεί στο σύστημα με πολλές άλλες μεθόδους και από διαφορετικές προελεύσεις. Μια οικονομική και απλή λύση είναι η χρησιμοποίηση ως οπτικής πηγής άντλησης μιας *Διόδου Εκπομπής Φωτός (Light Emitting Diode)* [14], [15]. Η μέθοδος αυτή παρέχει μια φθηνή και ταυτόχρονα απλή λύση που προσανατολίζεται κυρίως σε εφαρμογές τοπικού βρόχου όσον αφορά το δίκτυο πρόσβασης αφού κάθε χρήστης έχει αποκλειστικά ένα οπτικό κανάλι. Μια άλλη πρόταση στον ίδιο προσανατολισμό είναι η χρήση *Υπερακτινοβολουσών διόδων (Superluminescent diodes)*. Με αυτές ως φωτεινή πηγή έχει δειχθεί μετάδοση 10 καναλιών των 150 Mbps το

καθένα [16]. Ακόμη, ως φασματική πηγή έχει υποδειχθεί η *Ενισχυμένη Αυθόρμητη Εκπομπή (Amplified Spontaneous Emission)* από Ενισχυτές Ινών (π.χ EDFA) [17]. Η διαδικασία αυτή εμφανίζεται ως θόρυβος στους συμβατικούς ενισχυτές και έχει την προέλευση της στο φαινόμενο της αυθόρμητης εκπομπής φωτονίων. Τα φωτόνια αυτά καθώς ταξιδεύουν μέσα στην ίνα μπορούν να διεγείρουν άλλα φωτόνια που και αυτά θα εκπέμψουν μέσω αυθόρμητης και όχι εξαναγκασμένης εκπομπής. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να εμφανιστεί μέσα σε όλο το φάσμα εκπομπής των μεταβάσεων του ενισχυτή και μειώνει το διαθέσιμο κέρδος του ενισχυτή μειώνοντας σημαντικά το SNR του. Η διαδικασία αυτή μπορεί να διεγερθεί σε έναν ενισχυτή ίνας σπάνιας γαίας έτσι ώστε να παράγει ένα αυθόρμητο φάσμα εκπομπής το οποίο να καλύπτει ένα μεγάλο εύρος αρκετό για φασματικό διαχωρισμό και τελικά την χρήση του ως Πολυκυματικής Πηγής.

Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση αν σκοπός είναι μια Πολυκυματική Πηγή πολλών μηκών κύματος τα φάσματα αυτά δεν είναι σε καμία περίπτωση αρκετά. Απαιτήση υπάρχει για μεγαλύτερο διαθέσιμο φάσμα το οποίο μπορεί να δώσει πολλά περισσότερα κανάλια τα οποία σε κάποιες περιπτώσεις ποσοτικά μπορεί να διαφέρουν κατά τάξεις μεγέθους από τα προηγούμενα. Σε αυτή την κατεύθυνση είναι και οι μεθοδολογίες που έχουν προταθεί για την παραγωγή Supercontinuum, ενός όσο το δυνατόν περισσότερο επίπεδου και ευρέως φάσματος.

### **3.3.2 Φασματική Εξάπλωση – Δημιουργία Supercontinuum**

Η έννοια του Υπερσυνεχούς φάσματος ήδη είναι γνωστή από παλαιότερα [18] και από προηγούμενες εφαρμογές, όπως τη μέτρηση της *Διασποράς Ταχύτητας Ομάδας (Group Velocity Dispersion)* μια οπτικής ίνας σε ένα σχετικά μεγάλο φασματικό εύρος [19] και τη μέτρηση οπτικών κυματομορφών στα 100 Gbps με ανάλυση 0.6 ps [20]. Παρ' όλα αυτά η ιδέα του διαχωρισμού του για εφαρμογές DWDM έγινε αντιληπτή αργότερα. Η δημιουργία ενός τέτοιου φάσματος μπορεί να είναι αποτέλεσμα της συνδυαστικής επίδρασης, κατά τη διάδοση λεπτών παλμών μέσα σε μια οπτική ίνα, φαινομένων όπως η Διασπορά

αλλά και άλλων μη – γραμμικών όπως η Αυτοδιαμόρφωση Φάσης (SPM), η Ετεροδιαμόρφωση Φάσης (XPM), η Εξαναγκασμένη Σκέδαση Raman (SRS) και η Μίξη Τεσσάρων Φωτονίων (FWM) [21]. Η GVD παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο στην περίπτωση αυτή αφού η παράμετρος  $\beta_2$  δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να θεωρηθεί σταθερή σε ένα τόσο μεγάλο εύρος μηκών κύματος. Επιπλέον, η SRS μπορεί να γενικά να θεωρηθεί αμελητέα αφού δεν έχει πειραματικά επιβεβαιωθεί συμπεριφορά εξαρτώμενη από το μήκος κύματος, κάτι το οποίο είναι χαρακτηριστικό του φάσματος απολαβής Raman, παρουσιάζοντας συμμετρικό φάσμα ως προς την αρχική διέγερση.

Οι εφαρμογές που έχουν επιδειχθεί για φάσματα Supercontinuum είναι πολλαπλές και εξαιρετικά ενδιαφέρουσες και καλύπτουν αρκετές ερευνητικές περιοχές [22]:

- A. Στην τεχνολογία WDM ως φασματική πηγή τεράστιου εύρους ζώνης, που είναι αρκετό για Φασματικό Διαχωρισμό και παραγωγή πολλών φερόντων.
- B. Στην Βιοχημεία ως πηγή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση φωτο-ισομέρειας μεταξύ *trans*- και *cis*- μορφών.
- C. Στην *Τομογραφία OCT (Optical Coherence Tomography)* όπου η αξονική ανάλυση, που εξαρτάται από το διατιθέμενο εύρος ζώνης, είναι καθοριστική για την μεγαλύτερη διείσδυση σε ιστούς.
- D. Σε εφαρμογές Μετρολογίας για ακριβή μέτρηση συχνοτήτων και την κατασκευή εξαιρετικής ακριβείας ρολογιών.
- E. Σε περιβαλλοντικές εφαρμογές με ιδιαίτερη έμφαση σε έλεγχο ατμοσφαιρικών συνθηκών.

Στην περίπτωση των οπτικών επικοινωνιών η τεχνική παραγωγής Supercontinuum γίνεται με την βοήθεια των γραμμικών και μη – γραμμικών φαινομένων που απαντώνται κατά τη διάδοση παλμών σε μια οπτική ίνα και περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

### 3.3.2.1 Διάδοση Παλμών μέσα από Οπτική Ίνα

Οι οπτικοί παλμοί που παράγονται από Laser, LED, κτλ. και που διαδίδονται μέσα σε μια οπτική ίνα υπακούουν στην **Μη – Γραμμική Εξίσωση Schrödinger (Non – Linear Schrödinger Equation)** που στην γενική μορφή της φαίνεται παρακάτω [21]:

$$\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}U + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 U}{\partial T^3} = i\gamma \left[ |U|^2 U + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|U|^2 U) - T_R \frac{\partial |U|^2}{\partial T} U \right] \quad (3.3)$$

όπου  $U$  η κανονικοποιημένη περιβάλλουσα συνάρτηση του ηλεκτρικού πεδίου που διαδίδεται στην οπτική ίνα και  $\alpha$  ο όρος που υπολογίζει την εξασθένιση. Επίσης για την παράμετρο  $T$  ισχύει:  $T = t - z/v_g \equiv t - \beta_1 z$ . Ο φορμαλισμός της εξίσωσης υποδηλώνει στο αριστερό μέλος τους όρους της γραμμικής διάδοσης υπό την επίδραση της διασποράς δεύτερης ( $\beta_2$ ) και τρίτης τάξης ( $\beta_3$ ) αντίστοιχα, ενώ το δεξί μέλος της εξίσωσης περιλαμβάνει τους όρους μη – γραμμικής διάδοσης που εκφράζεται με τα φαινόμενα της Αυτοδιαμόρφωσης και Ετεροδοαμόρφωσης Φάσης και της Εξαναγκασμένης Σκέδασης Raman. Πιο συγκεκριμένα οι δύο πρώτοι όροι εκφράζουν την επίδραση των SPM και XPM αντίστοιχα, ενώ ο τρίτος όρος την SRS. Η σταθερά μη – γραμμικότητας  $\gamma$  ( $\text{W}\cdot\text{km}$ )<sup>-1</sup> δίνει ένα μέτρο του πόσο ισχυρή είναι η μη – γραμμικότητα και την εξάρτηση της διάδοσης από την ισχύ των παλμών εισόδου. Τα μη – γραμμικά είναι αποτέλεσμα της υψηλής ισχύος των παλμών εισόδου. Τα φαινόμενα αυτά έχουν την προέλευση τους στο **φαινόμενο Kerr** το οποίο προβλέπει ότι για μεγάλη εξωτερικά επιβαλλόμενη ισχύ πεδίου υπάρχει μη – γραμμική αλληλεπίδραση του υλικού μέσου που έχει σαν συνέπεια την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την ισχύ:

$$\bar{n}(\omega, |E|^2) = n(\omega) + n_2 |E|^2 \quad (3.4)$$

όπου  $n(\omega)$  το γραμμικό μέρος του δείκτη διάθλασης,  $n_2$  ο μη – γραμμικός συντελεστής του δείκτη διάθλασης ( $n_2 = 3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ) και  $|E|^2$  η στιγμιαία ισχύς μέσα στην ίνα.

Το φαινόμενο της διασποράς κατά τη διάδοση σε μια οπτική ίνα μπορεί να μελετηθεί ξεχωριστά από τα υπόλοιπα. Αν στη εξίσωση Schrödinger θέσουμε  $\gamma = 0$  (περίπτωση παλμών χαμηλής ισχύος) για να αγνοήσουμε τα μη - γραμμικά φαινόμενα και θέσουμε  $\beta_3 = 0$  λαμβάνοντας υπόψη μόνο φαινόμενα διασποράς δεύτερης τάξης τότε έχουμε:

$$i \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} \quad (3.5)$$

όπου:

$$\tau = \frac{T}{T_0} = \frac{t - z/v_g}{T_0} \quad (3.6) \quad , \quad A(z, \tau) = \sqrt{P_0} \exp(-az/2) U(z, \tau) \quad (3.7)$$

Μετασχηματίζοντας την παραπάνω σχέση κατά Fourier:

$$U(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}(z, \omega) \exp(-i\omega T) d\omega \quad (3.8)$$

έχουμε:

$$i \frac{\partial \tilde{U}}{\partial z} = -\frac{1}{2} \beta_2 \omega^2 \tilde{U} \quad (3.9)$$

και η λύση έχει τη μορφή:

$$\tilde{U}(z, \omega) = \tilde{U}(0, \omega) \exp\left(\frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 z\right) \quad (3.10)$$

Βλέπουμε από την παραπάνω λύση ότι το πλάτος του φασματικού περιεχομένου παραμένει το ίδιο ( $|\tilde{U}(z, \omega)| = |\tilde{U}(0, \omega)|$ ) και ότι η φάση της κάθε φασματικής συνιστώσας εξαρτάται από την ίδια τη συχνότητα και την κυματοδηγούμενη απόσταση. Υπό καθεστώς ομαλής διασποράς ( $\beta_2 > 0$ ), οι παλμοί εξαναγκάζονται σε διαπλάτυνση στο πεδίο του χρόνου αφού οι υψηλότερες συχνότητες καθυστερούν ως προς τις χαμηλότερες, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή για διάδοση του παλμού σε περιοχή ανώμαλης διασποράς ( $\beta_2 < 0$ ), οι παλμοί υφίστανται χρονική συμπίεση. Για την περίπτωση παλμών Gauss, αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση και υπολογίζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier έχουμε:

$$U(z, T) = \frac{T_0}{(T_0^2 - i\beta_2 z)^{1/2}} \exp\left(-\frac{T^2}{2(T_0^2 - i\beta_2 z)}\right) \quad (3.11)$$

Η διεύρυνση του παλμού δίνεται από τη σχέση:

$$T_1 = T_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{L_D} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

Η διάδοση σε μέσο με διασπορά περιορίζεται σε ένα μέγιστο μήκος μέχρι το οποίο η διάδοση των παλμών γίνεται χωρίς τόσο μεγάλη διεύρυνση ώστε να υπάρχει *διασυμβολική παρεμβολή*. Το μέγιστο μήκος αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (3.13)$$

Αν εξετάσουμε την εξάρτηση της φάσης του παλμού και την απόκλιση της στιγμιαίας συχνότητας προκύπτουν κατά τα γνωστά οι παρακάτω σχέσεις:

$$\varphi_D = -\frac{\text{sgn}(\beta_2) \left( \frac{z}{L_D} \right) T^2}{1 + \left( \frac{z}{L_D} \right)^2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{z}{L_D} \right) \quad (3.14)$$

$$\delta\omega = -\frac{\partial\varphi_D}{\partial T} = \frac{2\text{sgn}(\beta_2) \left( \frac{z}{L_D} \right) T^2}{1 + \left( \frac{z}{L_D} \right)^2} \frac{1}{T_0} \quad (3.15)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις οφείλουμε να παρατηρήσουμε το εξής: Κατά μήκος του παλμού υπάρχει μια *γραμμική* διαμόρφωση φάσης (γραμμικό chirping) του οποίου το πρόσημο εξαρτάται από το πρόσημο της παραμέτρου  $\beta_2$ .

Ωστόσο, εκτός από τα φαινόμενα διασποράς, σημαντικό ρόλο παίζουν και τα μη – γραμμικά φαινόμενα τα οποία μπορεί να έχουν παρόμοια επίδραση με τα γραμμικά αλλά δεν είναι σε καμία περίπτωση πλήρως αντιστρεπτά. Ο συντελεστής που εκφράζει και δίνει μια ποιοτική εκτίμηση των μη – γραμμικών φαινομένων είναι η παράμετρος  $\gamma$  της εξίσωσης Schrödinger. Η μη – γραμμική επίδραση περιλαμβάνει διάφορα επιμέρους φαινόμενα όπως η SPM, η XPM, η SRS και η FWM. Όμως παρά το γεγονός ότι τα παραπάνω φαινόμενα είναι εξίσου σημαντικά, κατά τη διάδοση παλμών σε μια οπτική ζεύξη, το φαινόμενο

που είναι το πλέον καθοριστικό είναι η Αυτοδιαμόρφωση Φάσης. Αν θεωρήσουμε την εξίσωση Schrödinger θεωρώντας αμελητέα την διασπορά ( $\beta_2 = 0$ ) τότε έχουμε:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2} a A - \gamma |A|^2 A \quad (3.16)$$

Η παραπάνω εξίσωση με τους μετασχηματισμούς:

$$\tau = \frac{T}{T_0} = \frac{t - z/v_g}{T_0} \quad (3.17) , \quad A(z, \tau) = \sqrt{P_0} \exp(-az/2) U(z, \tau) \quad (3.18)$$

γίνεται:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{i}{L_{NL}} \exp(-az) |U|^2 U \quad (3.19)$$

όπου  $L_{NL} = (\gamma P_0)^{-1}$  και η φυσική ερμηνεία της παραμέτρου αυτής θα δοθεί παρακάτω. Η λύση της εξίσωσης αυτής είναι της μορφής:

$$U(z, T) = U(0, T) \exp(i\varphi_{NL}(z, T)) \quad (3.20)$$

όπου  $U(0, T)$  η περιβάλλουσα του παλμού για  $z = 0$  ενώ για τη φάση:

$$\varphi_{NL}(z, T) = |U(0, T)|^2 \left( \frac{1 - \exp(-az)}{a L_{NL}} \right) \quad (3.21)$$

Το φασματικό εύρος παλμού Gauss στην περίπτωση αυτή είναι:

$$\delta\omega(T) = -\frac{\partial \varphi_{NL}}{\partial T} = \frac{2z_{eff}}{T_0 L_{NL}} \left( \frac{T}{T_0} \right) \exp\left( -\left( \frac{T}{T_0} \right)^2 \right) \quad (3.22)$$

Στην περίπτωση αυτή το φάσμα εξαπλώνεται καθώς ο παλμός διαδίδεται αφού το chirping που εισάγεται λόγω SPM παρουσιάζει αύξουσα εξάρτηση από την διανυόμενη απόσταση. Όπως και στην περίπτωση της διασποράς ορίζεται ένα μέγιστο μήκος διάδοσης σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα, ως εξής:

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (3.23)$$

όπου  $P_0$  η ισχύς κορυφής του παλμού. Ανάλογα με το μήκος της οπτικής ίνας και τις παραμέτρους της μπορούμε να κατατάξουμε τη μελέτη της διάδοσης σε οπτικές ίνες σε τέσσερις επιμέρους κατηγορίες:



**1.  $L \ll L_{NL} , L \ll L_D$**

Σε αυτή την περίπτωση ούτε η μη – γραμμικότητα επηρεάζει, αλλά ούτε και η διασπορά. Η οπτική ίνα παραμένει ένα παθητικό μέσο το οποίο δεν εισάγει παραμόρφωση στους μεταδιδόμενους παλμούς αλλά μόνο μια εξασθένιση.

**2.  $L \ll L_{NL} , L \geq L_D$**

Εδώ τα φαινόμενα διασποράς κυριαρχούν έναντι των μη – γραμμικών και ουσιαστικά η ζεύξη περιορίζεται μόνο από διασπορά και εξασθένιση.

**3.  $L \geq L_{NL} , L \ll L_D$**

Στην περίπτωση αυτή η διασπορά δεν επηρεάζει τη διάδοση αλλά κυριαρχούν τα μη – γραμμικά φαινόμενα. Η Αυτοδιαμόρφωση Φάσης είναι το σημαντικότερο φαινόμενο που οδηγεί σε φασματική διεύρυνση.

**4.  $L \geq L_{NL} , L \geq L_D$**

Η τελευταία και περισσότερο ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι αυτή κατά την οποία τα δύο φαινόμενα συνυπάρχουν και μάλιστα αλληλεπιδρούν λόγω της μη – γραμμικής φύσης ορισμένων από αυτά.

Η αλληλεπίδραση των φαινομένων της SPM και GVD μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση Schrödinger η οποία παίρνει τη μορφή:

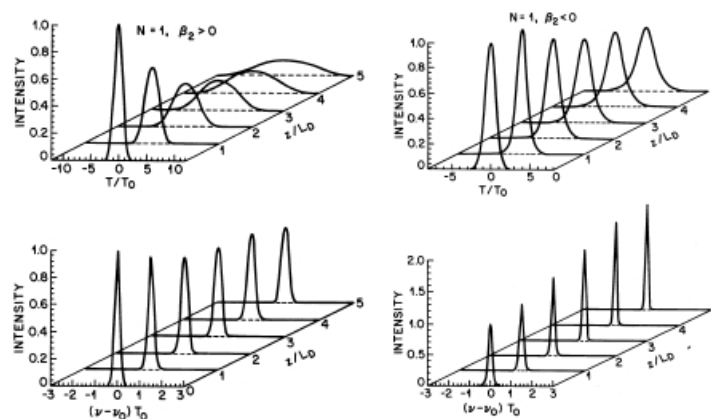
$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} = \frac{\text{sgn}(\beta_2)}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - N^2 e^{-a\xi} |U|^2 U \quad (3.24)$$

όπου  $\xi = z / L_D$  ,  $\tau = T / T_0$  και το  $N$  ορίζεται:

$$N^2 = \frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|} \quad (3.25)$$

Η παράμετρος  $N$  είναι μια ένδειξη της αλληλεπίδρασης μεταξύ μη – γραμμικότητας και διασποράς. Η εξίσωση Schrödinger σε αυτή την περίπτωση δεν έχει αναλυτικές λύσεις. Ωστόσο μια εκτίμηση μπορεί να γίνει για την εξέλιξη του παλμού κατά την κυματοδήγηση σε μια οπτική ίνα υπό αυτές τις συνθήκες:

- Στην περίπτωση της ομαλής διασποράς ο παλμός διευρύνεται γρηγορότερα από την περίπτωση της ύπαρξης μόνο GVD και αυτό οφείλεται στο ότι η SPM δημιουργεί νέες φασματικές συνιστώσες οι οποίες διευρύνουν το αρχικό φάσμα με αποτέλεσμα την εντονότερη επίδραση της GVD. Όσον αφορά το φασματικό περιεχόμενο του παλμού, αντίστοιχα η εξάπλωσή του είναι μικρότερη από την επίδραση της SPM και μόνο αυτής.
- Αντιθέτως για συνθήκες ανώμαλης διασποράς τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά. Ο παλμός αρχικά διευρύνεται σε ρυθμό πολύ μικρότερο από την περίπτωση απουσίας SPM αποκτώντας ένα σχεδόν σταθερό εύρος για  $z > 4L_D$ . Επιπρόσθετα, το φάσμα στενεύει αντί να εξαπλώνεται, κάτι το οποίο αναμένεται από την αποκλειστική επίδραση της SPM υπό την απουσία GVD. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό αν υπολογίσουμε ότι το chirp που προέρχεται από την Αυτοδιαμόρφωση Φάσης είναι θετικό, ενώ αυτό της Διασποράς αρνητικό. Έτσι, οι δύο αυτές συνεισφορές σχεδόν αλληλοαναιρούνται με τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία σολιτονίου.



Σχήμα 3.5: Εξέλιξη παλμού Gauss χωρίς αρχικό chirp και του αντίστοιχου φάσματος υπό καθεστώς SPM και GVD για  $\beta_2 > 0$  και  $\beta_2 < 0$  σε απόσταση  $z = 5L_D$  [21]

Εκτός όμως από την SPM και άλλα μη – γραμμικά φαινόμενα εμφανίζονται στις οπτικές ίνες όπως η Ετεροδιαμόρφωση Φάσης (XPM), η Μίξη Τεσσάρων Φωτονίων (FWM) και η Εξαναγκασμένη Σκέδαση Raman (SRS) τα οποία εμφανίζονται είτε εκεί όπου η ισχύς των παλμών είναι υψηλή (SRS), είτε εκεί όπου υπάρχει αλληλεπίδραση κυμάτων σε διαφορετικές φέρουσες συχνότητες (XPM, FWM).

Οι παλμοί που παράγονται από τα laser έχουν μια αρχική διαμόρφωση φάσης που ορίζεται ως *chirp* και εκφράζει τη μεταβολή της φέρουσας συχνότητας των παλμών ως συνάρτηση του χρόνου. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε στην είσοδο της οπτικής ίνας παλμούς Gauss με αρχικό chirp τότε μια έκφραση για την περιβάλλουσά τους είναι:

$$U(0,t) = \exp\left(-\frac{(1+jC)t^2}{2T_0^2}\right) \quad (3.26)$$

όπου  $C$  η παράμετρος του chirp για την οποία ισχύει:  $\Delta\omega * T_0 = (1+C^2)^{1/2}$ . Μια σχέση που περιγράφει την κυματοδηγήση παλμού με αρχικό chirp έπειτα από απόσταση  $z$  είναι:

$$U(z,t) = \frac{T_0}{[T_0^2 - j\beta_2 z(1+jC)]^{1/2}} \exp\left(-\frac{(1+jC)t^2}{2[T_0^2 - j\beta_2 z(1+jC)]}\right) \quad (3.27)$$

Αν υποθέσουμε ότι  $T_1$  το χρονικό εύρος του παλμού μετά από απόσταση  $z$  τότε θα ισχύει:

$$\frac{T_1}{T_0} = \left[ \left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.28)$$

Για το εύρος αυτό μπορούμε να διακρίνουμε 3 περιπτώσεις:

### 1. $\beta_2 C > 0$

Για την περίπτωση αυτή ισχύει πάντα  $T_1 > T_0$  και άρα έχουμε διαπλάτυνση του παλμού και το αρχικό chirp του παλμού δρα προσθετικά στην επίδραση της διασποράς.

## 2. $\beta_2 C = 0$ ( $C = 0$ )

Για αρχικό chirp μηδενικό η διασπορά επιδρά κατά τα γνωστά.

## 3. $\beta_2 C < 0$

Στην περίπτωση αυτή το chirp αρχικά επιδρά αντίθετα από τη διασπορά με αποτέλεσμα τη συμπίεση των παλμών στο πεδίο του χρόνου μέχρι ένα όριο στο οποίο οι παλμοί γίνονται *transform – limited*. Το μήκος στο οποίο συμβαίνει αυτό βρίσκεται παραγωγίζοντας την σχέση (3.28) ως προς  $z$  και είναι:

$$z_{\min} = \frac{C}{1+C^2} L_D \quad (3.29)$$

ενώ το εύρος του παλμού δίνεται από τη σχέση:

$$T_1^{\min} = \frac{T_0}{(1+C)^{1/2}} \quad (3.30)$$

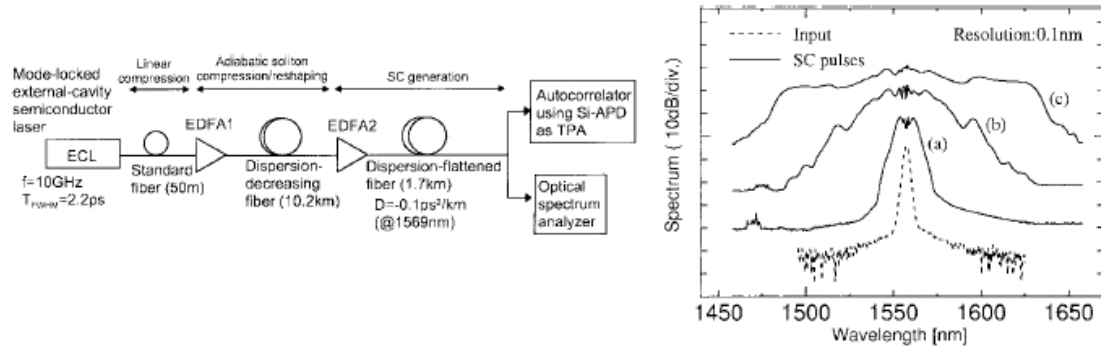
Αν ο παλμός εξακολουθεί να διαδίδεται σε μήκος μεγαλύτερο του  $z_{\min}$  τότε η διασπορά επικρατεί του αρχικού chirp και ο παλμός διευρύνεται όπως και στην 1<sup>η</sup> περίπτωση.

Η παραπάνω περίπτωση όπου ο συνδυασμός chirp και διασποράς συμπιέζουν το εύρος του παλμού χρησιμοποιείται σε αρκετές περιπτώσεις για την αρχική συμπίεση των παλμών ώστε να πλησιάζουν όσο είναι δυνατό το όριο στο οποίο είναι transform – limited και βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην υλοποίηση διατάξεων παραγωγής Supercontinuum.

### 3.3.2.2 Τεχνικές Παραγωγής Supercontinuum

Οι τεχνικές που έχουν ως τώρα προταθεί για την δημιουργία Supercontinuum βασίζονται στην εκμετάλλευση των διαφόρων γραμμικών και μη – γραμμικών φαινομένων μέσω τμημάτων οπτικών ινών με γνωστές τις παραμέτρους διασποράς και μη – γραμμικότητας και ορισμένου μήκους. Μια από τις πλέον τυπικές υλοποιήσεις για την

δημιουργία Supercontinuum χρησιμοποιεί ως παλμούς εισόδου εύρους 2.2 ps με αρχικό chirp που στην συνέχεια εισάγονται σε μια τυπική SMF ίνα μήκους 50 m με μηδενική διασπορά στα 1.3 μm και συμπιέζονται στα 1.6 ps [23]. Η συμπίεση των παλμών είναι αποτέλεσμα της συνδυαστικής επίδρασης του αρχικού chirp του παλμού με την αρνητική διασπορά της ίνας (περίπτωση όπου  $\beta_2 C < 0$ ).



Σχήμα 3.6: Τεχνική Δημιουργίας Supercontinuum και Φάσματα για διάφορες τιμές της ισχύος εισόδου (a) 45 mW (b) 140 mW (c) 210 mW [23]

Ακολούθως, οι παλμοί εισάγονται σε μια ίνα **Ελαττούμενης Διασποράς (Dispersion – Decreasing Fiber)** μήκους 10.2 km με την παράμετρο  $\beta_2$  να μεταβάλλεται βαθμιαία από -0.9 σε -0.2 ps<sup>2</sup>/km. Οι παλμοί που προκύπτουν είναι σχεδόν **Transform – limited**. Τελικά και έπειτα από ενίσχυση του σήματος, το σήμα εισέρχεται σε ίνα **Επίπεδης Διασποράς (Dispersion – Flattened Fiber)** με  $\beta_2 = 0.1 \text{ ps}^2/\text{km}$  ( $\beta_3 \approx 0$ ) και μήκος 1.7 km. Η διασπορά στην **DFF** ίνα είναι σχεδόν επίπεδη σε όλο το εύρος του φάσματος. Το φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η δημιουργία του Supercontinuum είναι η **Αδιαβατική Συμπίεση Σολιτονίων (Adiabatic Soliton Compression)**. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται ως εξής:

Για ένα θεμελιώδες (βασικής τάξης) σολιτόνιο το γινόμενο της ενέργειας του παλμού επί το τετράγωνο της διάρκειάς του είναι ανάλογο του κλάσματος της διασποράς προς τη μη – γραμμικότητα της οπτικής ίνας.

$$P_1 = \frac{|\beta_2|}{\gamma T_0^2} \cong \frac{3.11 |\beta_2|}{\gamma T_{FWHM}^2} \quad (3.31)$$

Έτσι, αν η διασπορά μειώνεται θα πρέπει να μειώνεται και το εύρος του παλμού ώστε να ισχύει η παραπάνω σχέση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την συμπίεση του παλμού που συνεπάγεται τη φασματική εξάπλωση που είναι και το ζητούμενο.

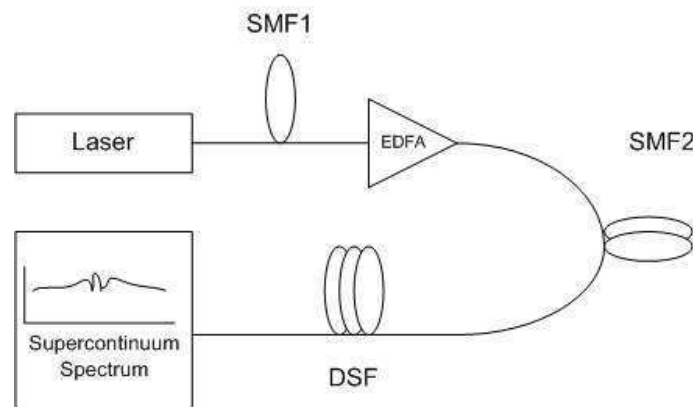
Ωστόσο για τη δημιουργία Supercontinuum με βάση το φαινόμενο της Αδιαβατικής Συμπίεσης Σολιτονίων θα πρέπει να ισχύουν κάποιες αρχικές συνθήκες όπως:

- A.** Οι αρχικοί παλμοί στην είσοδο της *DDF* ίνας θα πρέπει να ικανοποιούν τη συνθήκη σολιτονίου.
- B.** Η διασπορά της ίνας θα πρέπει να μεταβάλλεται σχετικά αργά, τόσο ώστε πρακτικά να μην μεταβάλλεται σε μια περίοδο σολιτονίου.
- C.** Η διασπορά της ίνας θα πρέπει να παραμένει ικανοποιητικά σταθερή σε όλο το εύρος που καταλαμβάνει το φάσμα των παλμών.

Με βάση τα παραπάνω έχουν δειχθεί πάνω από 20 φασματικά κανάλια με 100 GHz απόσταση και 10 GHz ρυθμό επανάληψης [24].

Σε μια απλούστερη υλοποίηση, η οποία θεωρείται η πλέον κοινή, το Supercontinuum προέρχεται από κοινές οπτικές ίνες τύπου *SMF* με τη βοήθεια οπτικών ινών τύπου *DSF (Dispersion – Shifted Fiber)* [25]. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον για την άντληση φάσματος υπερ – ευρείας ζώνης. Οι ίνες *DSF* είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε το σημείο μηδενικής διασποράς τους να είναι μετατοπισμένο από τα 1.3 μm, που ισχύει για τις κοινές *SMF* ίνες που είναι αμιγώς κατασκευασμένες από SiO<sub>2</sub>, σε μεγαλύτερα μήκη κύματος στο εύρος των 1.55 μm. Αυτό συνήθως γίνεται εφικτό μεταβάλλοντας το προφίλ δείκτη διάθλασης του πυρήνα και είναι επιθυμητό αφού η διασπορά στις κοινές *SMF* ίνες σε αυτά τα μήκη κύματος φτάνει σε πολύ υψηλές τιμές. Κάτι τέτοιο ωστόσο διεγείρει και φαινόμενα διασποράς τα οποία δρουν συνδυαστικά με την *SPM* και αποτρέπουν τη δημιουργία

Supercontinuum. Μια πιθανή διάταξη φαίνεται παρακάτω, αν και στις πρώτες επιδείξεις Supercontinuum με τη βοήθεια DSF το τμήμα με τις SMF ίνες δεν υπήρχε [26]:

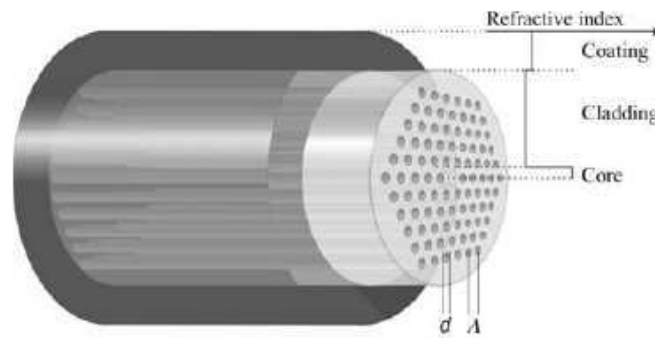


Σχήμα 3.7: Υλοποίηση Supercontinuum με τη βοήθεια κοινών SMF και DSF ινών.

Η χρήση της SMF1 οπτικής ίνας είναι απαραίτητη για τη συμπίεση του παλμού που προκύπτει από το laser αφού οι παλμοί κυματοδηγούνται στην περιοχή ανώμαλης διασποράς με αποτέλεσμα τη συμπίεση τους. Επιπλέον η ισχύς τους παραμένει αρκετά χαμηλή έτσι ώστε να μην διεγείρονται μη – γραμμικά φαινόμενα. Έπειτα ακολουθεί ενίσχυση του οπτικού σήματος με τη βοήθεια ενός EDFA ο οποίος και έχει ομαλή διασπορά. Για το λόγο αυτό ακολουθεί ένα ακόμη τμήμα SMF ίνας (SMF2) η οποία αναιρεί το chirp που έχει συσσωρευθεί. Τέλος, μια οπτική ίνα DSF χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του Supercontinuum η οποία συνήθως έχει χαμηλή ομαλή διασπορά στην περιοχή μετάδοσης (πχ.  $D = -1.8 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$  από [25]) αφού τώρα είναι επιθυμητό να ενεργοποιηθεί το φαινόμενο της SPM ενώ η GVD θα πρέπει να κρατηθεί σε χαμηλά επίπεδα. Παρόμοια λογική ακολουθεί και η αναφορά [27] μόνο που εναλλακτικά αντί για DSF χρησιμοποιεί στο τελικό στάδιο και ένα άλλο είδος οπτικής ίνας τύπου **HNLF (Highly Non – Linear Fiber)**. Στις οπτικές ίνες αυτές ο συντελεστής  $\gamma$  έχει υψηλές τιμές ώστε να ενεργοποιούνται πιο εύκολα τα μη – γραμμικά φαινόμενα.

Ως τώρα οι περισσότερες τεχνικές για δημιουργία Supercontinuum βασίζονταν σε κλασικές τεχνικές της μη – γραμμικής οπτικής που εφαρμόζονται σε οπτικές ίνες με γνωστά και ευρέως

χρησιμοποιούμενα εξαρτήματα. Ένας νέος τύπος οπτικών ινών ωστόσο έχει κάνει την εμφάνιση του τα τελευταία χρόνια, αυτός των **Φωτονικών Κρυσταλλικών Ινών (Photonic Crystal Fiber)** [29]. Οι οπτικές ίνες **PCF** έχουν μια διαφορετική δομή από τις κοινές ίνες αφού το περίβλημα της ίνας δεν είναι συμπαγές αλλά διάτρητο.



Σχήμα 3.8: Δομή οπτικής ίνας PCF με παραμέτρους  $d$  και  $\Lambda$  [28]

Πιο συγκεκριμένα, ενώ στις κοινές **SMF** ίνες η κυματοδήγηση οφείλεται στη διαφορά του δείκτη διάθλασης μεταξύ πυρήνα και περιβλήματος, που αποτελούνται από το ίδιο υλικό με τη διαφορά ότι ο πυρήνας περιέχει προσμίξεις που του προσδίδουν διαφορετικές ιδιότητες. Η καινοτομία που εισάγουν οι ίνες **PCF** έγκειται στο ότι το περίβλημα πλέον δεν είναι και δεν αποτελείται από συμπαγές πυρίτιο αλλά έχει μια μικροδομή που αποτελείται από ένα πλέγμα από οπές αέρα. Οι οπές αυτές εκτείνονται κατά μήκος του άξονα της οπτικής ίνας και ο σκοπός που βρίσκονται εκεί είναι για να ελαττώσουν τον ενεργό δείκτη διάθλασης του περιβλήματος, μιας και ο δείκτης διάθλασης του διοξειδίου του πυριτίου ( $n_{SiO_2} \approx 1.45$ ) είναι σημαντικά μεγαλύτερος από αυτόν του αέρα ( $n_{air} = 1$ ).

Οι παράμετροι της οπτικής ίνας που καθορίζονται από τη σχεδίαση της είναι ιδιαίτερα τροποποιήσιμες μέσω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της αλλά και των πιθανών προσμίξεων που μπορεί να περιέχει ο πυρήνας και αυτό είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των PCF έναντι των κοινών οπτικών ινών. Βασική παράμετρος, εκτός της δομής του πλέγματος των οπών, είναι ο λόγος  $d/\Lambda$  όπου  $d$  η διάμετρος των οπών και  $\Lambda$  η απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο



γειτονικών οπών [30]. Το γεγονός αυτό δίνει τεράστια ευελιξία στη σχεδίαση των χαρακτηριστικών διασποράς και μη – γραμμικότητας των PCF ινών με αποτέλεσμα την κατασκευή διαφόρων τύπων για εξειδικευμένες εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά οι ίνες αυτές δεν θεωρούνται ακόμη ικανές για μετάδοση μιας και παρουσιάζουν υψηλές απώλειες, αν και έχουν δειχθεί PCF με  $a = 0.28 \text{ dB/km}$  και για το λόγο αυτό περιορίζεται η χρήση τους σε άλλες εφαρμογές.

Στις ίνες PCF που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία Supercontinuum ο βασικός μηχανισμός που ενεργοποιείται είναι η Αυτοδιαμόρφωση φάσης λόγω της υψηλής τιμής που λαμβάνει η παράμετρος  $\gamma$  η οποία μπορεί να κυμαίνεται σε τιμές της τάξης των  $11 \text{ (W}\cdot\text{km)}^{-1}$  και μπορούν να αποτελέσουν μια εξαιρετική πηγή Supercontinuum με μήκη της τάξης των μερικών δεκάδων μέτρων (πχ. 50 m). Επιπλέον, λόγω της εξαιρετικής διαχείρισης της διασποράς που επιτρέπουν οι PCF είναι δυνατόν να παρέχουν ένα επίπεδο προφίλ διασποράς σε μεγάλο εύρος μηκών κύματος<sup>2</sup>.

### 3.3.3 Φασματικός Διαχωρισμός

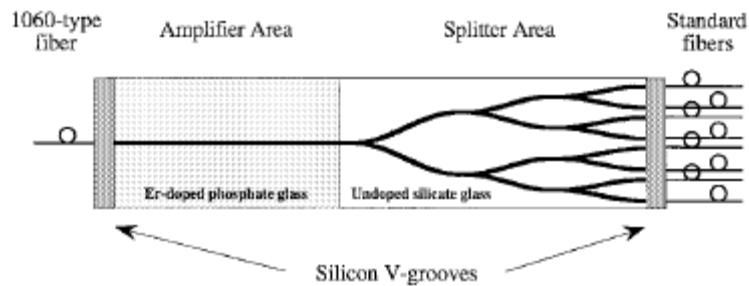
Το τελευταίο τμήμα των πολυκυματικών πηγών συνήθως αποτελείται από διατάξεις οι οποίες επιτελούν το διαχωρισμό των καναλιών, «κόβοντας» το Supercontinuum που έχουμε στο προηγούμενο στάδιο δημιουργήσει σε επιμέρους φασματικά κανάλια. Αυτή η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες διατάξεις που έχουν κατά καιρούς δειχθεί.

Μια διάταξη που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη διαίρεση WDM καναλιών είναι ο *διαχωριστής WDM (WDM splitter)*. Ο splitter αποτελείται συνήθως από διάφορα τμήματα οπτικών κυματοδηγών που ενώνονται μεταξύ τους σε μια δενδροειδή δομή διαχωρίζοντας έτσι φασματικά κανάλια με σταθερή απόσταση μεταξύ τους που μπορούν να

---

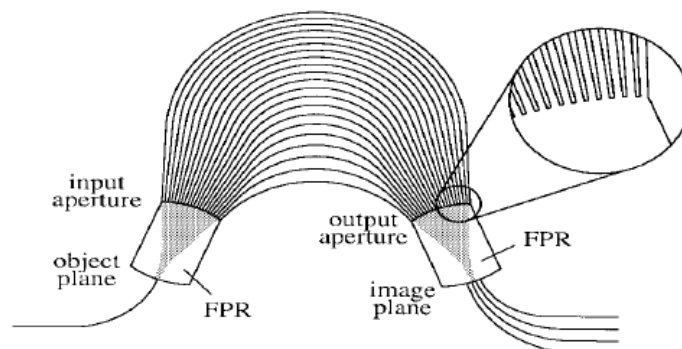
<sup>2</sup> Σε επόμενο κεφάλαιο όπου θα γίνει θεωρητική ανάλυση της υπό μελέτη πολυκυματικής πηγής θα αναλυθούν εκτενέστερα η λειτουργία και οι ιδιότητες των PCF.

συντονιστούν ώστε να ταυτίζονται με το πλέγμα της ITU. Η συγκεκριμένη διάταξη μάλιστα έχει δειχθεί και σε ολοκληρωμένη μορφή με 8 φασματικά κανάλια απόστασης περίπου 1 nm μεταξύ τους.



Σχήμα 3.9: WDM splitter/combiner 8-σε-1 με ενίσχυση [31]

Σε μια άλλη εκδοχή [32] που έχει παρουσιαστεί το DWDM φάσμα προκύπτει με τη βοήθεια μιας **Συστοιχίας Φράγματος Περίθλασης (Arrayed Waveguide Grating)**. Η διάταξη αυτή μπορεί να κατασκευαστεί και σαν ολοκληρωμένο επίπεδο οπτικό κύκλωμα.



Σχήμα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση ενός AWG [33]

Στην περίπτωση αυτή το σήμα εισέρχεται σε μια είσοδο του AWG και εξέρχεται από κάθε έξοδο του, λειτουργώντας ως οπτικό φίλτρο. Το φιλτράρισμα μήκους κύματος βασίζεται στο φαινόμενο της συμβολής και στα διαφορετικά μήκη των μονορυθμικών κυματοδηγών: κάθε φασματική συνιστώσα του σήματος εισόδου διαδίδεται μέσω όλων των κυματοδηγών και η έξοδος σε κάθε κανάλι προκύπτει από την υπέρθεση όλων αυτών των συνιστωσών, οι οποίες αποκτούν μετατοπίσεις φάσης που εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Ένα σημαντικό μειονέκτημα

που προκύπτει από τη χρήση AWG είναι το γεγονός ότι οι συγκεκριμένες διατάξεις διατίθενται προς το παρόν με μικρό αριθμό εισόδων και εξόδων, αν και έχει δειχθεί AWG 128x128, κάτι το οποίο περιορίζει σημαντικά τον αριθμό των παραγόμενων καναλιών και το καθιστά ακατάλληλο ως πηγή DWDM .

Η πλέον όμως πρακτική λύση για το διαχωρισμό του φάσματος είναι τα Συμβολόμετρα Fabry – Perot. Η χρήση των Fabry – Perot υπερέχει συγκριτικά με τις υπόλοιπες υλοποιήσεις στο γεγονός ότι είναι δυνατόν να επιτευχθεί φασματικός διαχωρισμός του Supercontinuum σε ένα πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων που σε πολλές περιπτώσεις καλύπτει όλη την μάντα μετάδοσης των 1550 nm. Ωστόσο η χρήση τους μόνο τα τελευταία χρόνια έγινε εφικτή αφού η κατασκευή Fabry – Perot με FSR 50 και 100 GHz, που είναι η φασματική απόσταση των καναλιών της ITU, δεν ήταν δυνατή. Με τη χρήση Fabry – Perot στην έξοδο πολυκυματικών πηγών έχουν δειχθεί υλοποιήσεις με πολύ μεγάλο αριθμό καναλιών [34].

Η τεχνολογία των Πολυκυματικών Πηγών αναμένεται να συμβάλλει σημαντικά στην ακόμη περισσότερο μείωση του κόστους των εμπορικών συστημάτων DWDM. Ωστόσο, η υλοποίησή τους σε εμπορική μορφή απαιτεί και κάποιες επιπλέον προδιαγραφές, όπως για παράδειγμα την υψηλή ισχύ εξόδου για long – haul δίκτυα.

### **3.4 Αναφορές 3<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**

- [1] G. P. Agrawal, “*Fiber-Optic Communication Systems*”, 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley & Sons Inc., NY, 2002
- [2] I. P. Kaminow and T. Li, “*Optical fiber telecommunications IVA Components*”, Academic Press Inc., NY, 2002
- [3] Η. Αβραμόπουλος, Σημειώσεις του μαθήματος «Φωτονική Τεχνολογία στις Τηλεπικοινωνίες»
- [4] K. Iga, “*Surface-Emitting Laser—Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field*”, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 6, pp. 1201-1215, Nov. /Dec. 2000
- [5] H. Okuda et al., “*Five-wavelength integrated DFB laser arrays with quarter-wave-shifted structure*”, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 23, pp. 843–844, 1987
- [6] T.-P. Lee et al., “*Multiwavelength DFB laser array transmitters for ONTC reconfigurable optical network testbed*”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 14, pp. 967–976, Jun. 1996
- [7] M. G. Young et al., “*A 16×1 wavelength division multiplexer with integrated distributed Bragg reflector lasers and Electroabsorption modulators*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 5, No. 8, pp. 908-910, Aug. 1993
- [8] S. L. Lee, “*Monolithically Integrated Multiwavelength Sampled Grating DBR Lasers for Dense WDM Applications*”, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 1, pp. 197-206, Jan/Feb 2000
- [9] D. Francis et al., “*Monolithic 2D-VCSEL array with 0.2W CW output power*”, in 16th Int. Semiconductor Laser Conf., Oct. 1998, TuE3, pp. 99– 100

- [10] W. Yuen et al., “*Multiple-Wavelength Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Arrays*”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 3, No. 2, pp. 422-428, Apr. 1997
- [11] M. Zirngibl et al., “*An 18 Channel Multifrequency Laser*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, No. 7, pp.870-872 , Jul. 1996
- [12] M. C. Nuss, W. H. Knox, and U. Koren, “*Scalable 32 channel chirped pulse WDM source*”, Electronics Letters, vol. 32, pp. 1311–1312, 1996
- [13] E. A. De Souza, M. C. Nuss, W. H. Knox, and D. A. B. Miller, “*Wavelength-division multiplexing with femtosecond pulses*”, Electronics Letters, vol. 20, no. 16, pp. 1166–1168, 1995
- [14] M. H. Reeve et al., “*LED spectral slicing for single-mode local loop applications*”, Electronics Letters, vol. 24, pp. 389–390, 1988
- [15] K.-Y. Liou et al., “*A 24-Channel WDM Transmitter for Access Systems Using a Loop-Back Spectrally Sliced Light-Emitting Diode*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, No. 2, pp. 270-272, Feb. 1998
- [16] S. S. Wagner and T. E. Chapuran, “*Broadband high-density WDM transmission using superluminescent diodes*”, Electronics Letters, vol. 26, pp. 696–697, 1990
- [17] J. S. Lee et al., “*Spectrum-sliced fiber amplifier light source for multichannel WDM applications*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 5, pp. 1458–1461, 1993
- [18] R. R. Alfano and S. L. Shapiro, “*Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass*”, Physics Review Letters, **24**, 584, 1970
- [19] K. Mori, T. Morioka, and M. Saruwatari, “*Group velocity dispersion measurement using supercontinuum picosecond pulses generated in an optical fiber*”, Electronics Letters, vol. 29, no. 11, pp. 987–989, 1993

- [20] H. Takara et al., “*100 Gb/s optical waveform measurement with 0.6 ps resolution optical sampling using subpicosecond supercontinuum pulses*”, Electronics Letters, vol. 30, no. 14, pp. 1152–1153, 1994
- [21] G. P. Agrawal, “*Nonlinear Fiber Optics*”, 3rd Ed., Academic Press Inc., CA, 2001
- [22] R. R. Alfano, “*The Supercontinuum Laser Source*”, 2<sup>nd</sup> Ed., Springer Science & Business Media, Inc., NY, 2006
- [23] Y. Takushima et al., “*Generation of over 140-nm-wide Super-Continuum from a Normal Dispersion Fiber by using a Mode-Locked Semiconductor Laser Source*”, IEEE Photonics Technology Letters Vol. 10, No. 11, pp. 1560-1562, Nov. 1998
- [24] Y. Takushima and K. Kikuchi, “*10-GHz, Over 20-Channel Multiwavelength Pulse Source by Slicing Super-Continuum Spectrum Generated in Normal-Dispersion Fiber*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 3, pp. 322-324, Mar. 1999
- [25] B. Mikulla et al., “*Broad-Band High-Repetition-Rate Source for Spectrally Sliced WDM*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 4, pp. 418-420, Apr. 1999
- [26] T. Morioka et al., “*Multi-WDM channel, Gbit/s pulse generation from a single laser source utilizing LD-pumped supercontinuum in optical fibers*,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6, No. 3, pp. 365–368, Mar. 1994
- [27] Ö. Boyraz et al., “*10 Gb/s Multiple Wavelength, Coherent Short Pulse Source Based on Spectral Carving of Supercontinuum Generated in Fibers*”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 12, pp. 2167–2175, Dec. 2000
- [28] Kim P. Hansen and Renè E. Kristiansen, “*Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fibers*”, Application Note by Crystal Fibre A/S available at: [www.crystal-fibre.com](http://www.crystal-fibre.com)

- 
- [29] T. A. Birks, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, “*Endlessly single-mode photonic crystal fiber*”, Optics Letters, Vol. 22, No. 13, pp. 961-963, 1997
- [30] J. Broeng, D. Mogilevstev, S. E. Barkou and A. Bjarklev, “*Photonic crystal fibers: a new class of optical waveguides*”, Optical Fiber Technology, Vol. 5, pp. 305-330, 1990
- [31] Y. Jaouën et al., “*Eight-Wavelength Er–Yb Doped Amplifier: Combiner/Splitter Planar Integrated Module*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 9, pp. 1105–1107, Sep. 1999
- [32] I. Y. Krushchev et al., “*Multiwavelength Pulse Source for OTDM/WDM Applications Based on Arrayed Waveguide Grating*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 12, pp. 1659–1661, Dec. 1999
- [33] G. P. Agrawal, “*Fiber-Optic Communication Systems*”, 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley & Sons Inc., NY, 2002
- [34] P. Bakopoulos et al., “*Multi-Wavelength Laser Source for Dense Wavelength Division Multiplexing Networks*”, presented at the Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2007, Anaheim, CA





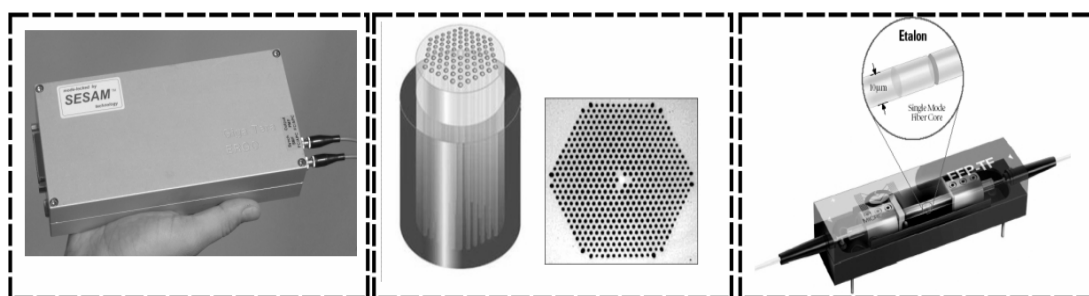
# **Κεφάλαιο 4**

**Θεωρητική Ανάλυση**

**Πολυκυματικής Πηγής DWDM**

## 4.1 Εισαγωγή

Στην τεχνολογία των Πολυκυματικών Πηγών ως σήμερα έχουν προταθεί διάφορες υλοποιήσεις που έχουν προκύψει από διαφορετικές κατευθύνσεις και ιδέες. Η βασική ιδέα που φαίνεται να έχει επικρατήσει ως σήμερα είναι αυτή των Πολυκυματικών Πηγών που βασίζονται στον Φασματικό Διαχωρισμό ενός Supercontinuum με τη βοήθεια διαφόρων οπτικών διατάξεων. Έχοντας προηγουμένως παρουσιάσει εν συντομία κάποιες από αυτές, προχωρούμε στην θεωρητική ανάλυση της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 4.1: Τα βασικά στοιχεία της πειραματικής διάταξης

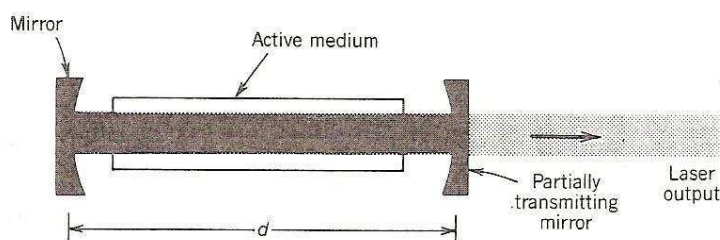
Κατά την ανάλυση αυτή θα εξηγηθεί πλήρως η λειτουργία του laser και θα εξαχθεί μια αναλυτική έκφραση για τους παλμούς εξόδου του. Στη συνέχεια θα ακολουθήσει ανάλυση της λειτουργίας της PCF οπτικής ίνας που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του Supercontinuum και θα επιχειρηθεί μια προσέγγιση για τα αποτελέσματα που θα προκύψουν. Τέλος, θα εξηγηθεί η λειτουργία των συμβολόμετρων Fabry – Perot και θα γίνει εφαρμογή της συνάρτησης μεταφοράς τους στο παραγόμενο Supercontinuum. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης θα βοηθήσουν σημαντικά στη συνέχεια για την αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων αλλά και αυτών που θα προκύψουν από την προσομοίωση και θα επιχειρηθεί μια σύγκριση μεταξύ τους για να εκτιμηθεί η λειτουργία της πολυκυματικής πηγής. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει εξετάζει κάθε τμήμα της πηγής ξεχωριστά λαμβάνοντας το προηγούμενο από αυτό ως είσοδό του.

## 4.2 Ανάλυση λειτουργίας του Laser ERGO

Η είσοδος της υπό μελέτη Πολυκυματικής Πηγής είναι ένα laser τύπου **ERGO**. Η τεχνολογία των laser αυτών βασίζεται στην τεχνική του **Παθητικού Κλειδώματος Τρόπων Ταλάντωσης (Passive Mode – Locking)** με τη βοήθεια ενός **SESAM (SEmiconductor Saturable – Absorber Mirror)** ενώ για το κέρδος χρησιμοποιεί **Κρύσταλλο Er:Yb** και υπόσχεται στενούς παλμούς της τάξης των ps. Αρχικά θα πραγματοποιηθεί μια γενική ανάλυση των laser ημιαγωγών και στη συνέχεια θα περιγραφεί και αναλυθεί η λειτουργία του συγκεκριμένου laser.

### 4.2.1 Θεωρία Ταλάντωσης Laser

Το laser μπορεί να περιγραφεί σαν ένας οπτικός ταλαντωτής ο οποίος ανατροφοδοτεί την έξοδό του στην είσοδο με συνάφεια φάσης. Μια κοιλότητα laser φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.2: Κοιλότητα Laser

Η κοιλότητα στην απλούστερη περίπτωση αποτελείται από τα δύο κάτοπτρα και το μέσο κέρδους. Το ένα από τα δύο κάτοπτρα έχει 100% ανακλαστικότητα ενώ το άλλο όχι. Η διαδικασία της ταλάντωσης εκκινείται από την παρουσία θορύβου, όπως σε πολλούς ταλαντωτές, με αποτέλεσμα, μέσω Εξαναγκασμένης Εκπομπής και ανατροφοδότησης, την σταθερή κατάσταση. Για να συμβεί κάτι τέτοιο ωστόσο θα πρέπει να ικανοποιούνται δυο συνθήκες [1]:

1. Το κέρδος του ενισχυτή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τις απώλειες της κοιλότητας.
2. Η ολική μετατόπιση φάσης σε πλήρη ταλάντωση (round trip) θα πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του  $2\pi$  ώστε να υπάρχει συνοχή φάσης μεταξύ εισόδου και εξόδου.

Για να ισχύει η πρώτη συνθήκη, που είναι βασική για την εκκίνηση της διαδικασίας του lasing, θα πρέπει να συμβεί το φαινόμενο της *αναστροφής πληθυσμού*. Η αναστροφή πληθυσμού συμβαίνει όταν:

$$N_2 > N_1 \quad (4.1)$$

όπου  $N_2$  το πλήθος των ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε διεγερμένη στάθμη και  $N_1$  αυτά που βρίσκονται στη βασική στάθμη του υλικού κέρδους της κοιλότητας. Η επίτευξη της αναστροφής πληθυσμού γίνεται με τη βοήθεια κάποιου εξωτερικού διεγέρτη, όπως για παράδειγμα την έγχυση ρεύματος στα laser ημιαγωγών. Η τοποθέτηση του υλικού του κέρδους στην κοιλότητα σε συνδυασμό με την οπτική άντληση η οποία ξεπερνά κάποιο επίπεδο, οδηγούν το μεγαλύτερο μέρος του φωτός να προέρχεται από Εξαναγκασμένη και όχι Αυθόρμητη Εκπομπή. Με τη βοήθεια της ανάδρασης η Εξαναγκασμένη εκπομπή υπερिशύει της Αυθόρμητης και έτσι το φως που παράγεται έχει συνοχή φάσης. Οι ιδιοσυχνότητες της κοιλότητας δίνονται από τη σχέση:

$$f_q = \frac{qc}{2nL} \quad (4.2)$$

όπου  $q = 1, 2, \dots, N$ ,  $c$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό,  $n$  ο δείκτης διάθλασης της κοιλότητας και  $L$  το μήκος της. Αν υποθέσουμε αρχική ένταση πεδίου μέσα στην κοιλότητα  $E_0$  τότε μετά από μια ανάκλαση έχουμε:

$$E_1 = \sqrt{R}E_0 \exp\left[(\Gamma g - a)L - j\frac{2\pi Ln}{\lambda}\right] \quad (4.3)$$

όπου  $R$  η ανακλαστικότητα του κατόπτρου,  $\Gamma$  ο παράγοντας σύμπτυξης,  $g$  το κέρδος ανά μονάδα μήκους του υλικού και  $a$  οι απώλειες ανά μονάδα μήκους. Γενικά η σχέση για  $k$  αριθμούς ανακλάσεων είναι:

$$E_k = (\sqrt{R})^k E_0 \exp\left[k(\Gamma g - a)L - j\frac{2\pi Ln}{\lambda}k\right] \quad (4.4)$$

Το πραγματικό μέρος του πεδίου καθορίζει την απολαβή του laser, δηλαδή την ισχύ στην έξοδο του laser συναρτήσει του ρεύματος άντλησης (χαρακτηριστική P-I), ενώ το φανταστικό μέρος την απόσταση μεταξύ των τρόπων ταλάντωσης και τη θέση τους κάτω από την περιβάλλουσα. Οι συνθήκες για την λειτουργία του laser θα είναι τώρα:

1. Το καθαρό κέρδος να ξεπερνά τις απώλειες, δηλαδή:

$$R \exp[2(\Gamma g - a)L] \geq 1 \Rightarrow \quad (4.5)$$

$$\Rightarrow \Gamma g \geq a - \frac{\ln R}{2L} \quad (4.6)$$

2. Όλες οι φάσεις να είναι προσαρμοσμένες, δηλαδή:

$$\lambda = \frac{2nL}{i} \quad (4.7)$$

όπου  $i = 1, 2, \dots, N$

Βλέπουμε ότι η βασική παράμετρος που καθορίζει την απολαβή είναι το κέρδος ανά μονάδα μήκους  $g$  που είναι συνάρτηση της πυκνότητας φορέων:

$$g(N) = a(N - N_0) \quad (4.8)$$

όπου  $a$  η διαφορική απολαβή και  $N_0$  η πυκνότητα φορέων στο σημείο. Η αύξηση της άντλησης πάνω από το ρεύμα κατωφλίου  $I_{th}$  εξαναγκάζει περισσότερο τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού σε εξαναγκασμένες αποδιεγέρσεις παρά σε αυθόρμητη εκπομπή. Το κατώφλι αυτό δίνεται από:

$$I_{th} = \frac{qdwLN_{th}}{\tau_e} \quad (4.9)$$

όπου  $d$ ,  $w$ ,  $L$  οι διαστάσεις της κοιλότητας,  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $\tau_e$  ο χρόνος επανασύνδεσης. Η καμπύλη P - I είναι γραμμική μεταξύ των περιοχών όπου δεν έχει επιτευχθεί αναστροφή πληθυσμού ( $I < I_{th}$ ) και του σημείου κορεσμού με κλίση:

$$\frac{dP}{dI} = \frac{hf n_d}{2q n_i} \quad (4.10)$$

όπου ο λόγος  $n_d/n_i$  εκφράζει το ποσοστό των επιπλέον εγχεόμενων ηλεκτρονίων που παράγουν φωτόνια που έχουν προκύψει από εξαναγκασμένη αποδιέγερση και καταλήγουν στην έξοδο της διάταξης προς τα συνολικά, δηλαδή προς τα συνολικά παραγόμενα μέσω εξαναγκασμένης αποδιέγερσης. Ο λόγος αυτός δίνεται από:

$$\frac{n_d}{n_i} = \frac{\ln(1/R)}{\ln(1/R) + 2aL} \quad (4.11)$$

όπου  $R$ ,  $a$ ,  $L$  όπως και στην (4.3).

Η περιγραφή των φαινομένων στα laser ημιαγωγών μπορεί να γίνει με τη βοήθεια των εξισώσεων ροής. Από τις δύο αυτές εξισώσεις, η πρώτη περιγράφει το ρυθμό μεταβολής της πυκνότητας φορέων και η δεύτερη τη μεταβολή της πυκνότητας των φωτονίων:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{qLwd} - \frac{N(t)}{\tau_e} - \frac{\Gamma ac}{n} [N(t) - N_0] \Pi(t) \quad (4.12)$$

$$\frac{d\Pi(t)}{dt} = \frac{\Gamma ac}{n} [N(t) - N_0] \Pi(t) - \frac{\Pi(t)}{\tau_e} + \frac{R_{sp}}{Lwd} \quad (4.13)$$

όπου  $N(t)$  η πυκνότητα φορέων,  $\Pi(t)$  η πυκνότητα φωτονίων,  $I(t)$  το ρεύμα άντλησης,  $n$  ο ισοδύναμος δείκτης διάθλασης μέσα στην κοιλότητα,  $a$  η σταθερά απολαβής,  $w$ ,  $d$ ,  $L$  οι διαστάσεις της κοιλότητας,  $\Gamma$  ο παράγοντας σύμπτυξης των εγκάρσιων τρόπων ταλάντωσης,  $N_0$  η πυκνότητα φορέων στο σημείο διαφάνειας και  $R_{sp}$  ο ρυθμός ανά μονάδα όγκου με τον οποίο τα αυθόρμητα εκπεμπόμενα φωτόνια προστίθενται στην κοιλότητα της ενεργού περιοχής. Η ισχύς εξόδου που είναι και το πιο ενδιαφέρον μέγεθος δίνεται από:

$$P(t) = \frac{hfc}{n} (1-R) wd \Pi(t) \quad (4.14)$$

Μέσα στην κοιλότητα του laser ταλαντώνονται πολλοί διαμήκεις τρόποι καθένας από τους οποίους βλέπει διαφορετική εξασθένιση. Κάθε τρόπος έχει διακριτή συχνότητα που δίνεται από:

$$f_q = \frac{qc}{2nL} \quad (4.15)$$

Στην έξοδο του laser διαδίδονται μόνο οι ρυθμοί που συμπίπτουν με την καμπύλη κέρδους. Η καμπύλη κέρδους του laser δίνεται από:

$$\gamma_0(f) = N_0 \sigma(f) = N_0 \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}} g(f) \quad (4.16)$$

όπου  $N_0$  η διαφορά πυκνότητας φορέων σε ισορροπία,  $t_{sp}$  ο χρόνος ζωής αυθόρμητης εκπομπής, και  $g(f)$  η καμπύλη μετάβασης. Όσο η πυκνότητα ροής φωτονίων αυξάνεται το κέρδος του laser μπαίνει σε κορεσμό και η πυκνότητα του πληθυσμού μειώνεται σε:

$$N = \frac{N_0}{1 + \Pi/\Pi_s(f)} \quad (4.17)$$

όπου  $\Pi_s(f)$  η πυκνότητα ροής φωτονίων κορεσμού. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της καμπύλης κέρδους σε:

$$\gamma(f) = \frac{\gamma_0(f)}{1 + \Pi/\Pi_s(f)} \quad (4.18)$$

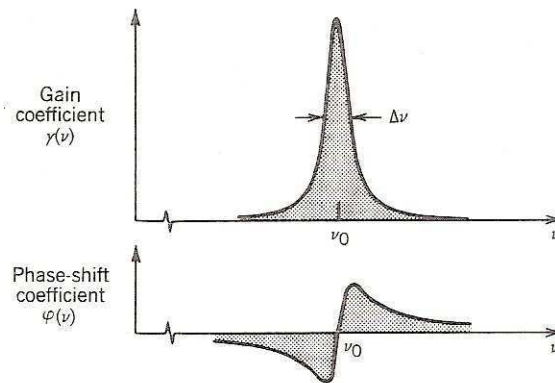
Η καμπύλη μετάβασης  $g(f)$  εξαρτάται από το μέσο κέρδους και δίνεται από την έκφραση:

$$g(f) = \left( \frac{\Delta f}{2\pi} \right) \left[ (f - f_0)^2 + \left( \frac{\Delta f}{2} \right)^2 \right] \quad (4.19)$$

και εισάγει μια ανά μονάδα μήκους μετατόπιση φάσης που δίνεται από:

$$\varphi(f) = \frac{f - f_0}{\Delta f} \gamma(f) \quad (4.20)$$

Οι καμπύλες των δυο παραπάνω συναρτήσεων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.3: Σταθερά κέρδους και μετατόπιση φάσης ενός laser [2]

Ωστόσο κάθε ένας από τους τρόπους ταλάντωσης δεν έχει μηδενικό φάσμα, αλλά έχει ένα εύρος που δίνεται από τη σχέση:

$$\delta f = \frac{f_1}{F} = \frac{c_0}{2nLF} \quad (4.21)$$

όπου  $F$  η λεπτότητα της κοιλότητας Fabry – Pérot.

#### **4.2.2 Τεχνική Κλειδώματος Τρόπων Ταλάντωσης (Mode – Locking)**

Ένα laser μπορεί να ταλαντώνεται με πολλούς διαμήκεις τρόπους ταλάντωσης οι οποίοι έχουν σταθερή φασματική απόσταση μεταξύ τους. Παρόλο που οι τρόποι αυτοί ταλαντώνονται ανεξάρτητα, με τη βοήθεια εξωτερικών μέσων μπορούν να κλειδωθούν οι φάσεις τους. Ο συνδυασμός των διαφόρων αυτών τρόπων ταλάντωσης γίνεται με σκοπό την δημιουργία εξαιρετικά λεπτών παλμών με εύρος που είναι της τάξης των ps αλλά και fs σε πολλές περιπτώσεις.

Έστω ότι κάθε τρόπος ταλάντωσης μπορεί να εκφραστεί από ένα επίπεδο κύμα στην κατεύθυνση  $z$ :

$$U(z,t) = \sum_q A_q \exp\left[j2\pi f_q \left(t - \frac{z}{c}\right)\right] \quad (4.22)$$

όπου:

$$f_q = f_0 + qf_F \quad (4.23)$$

Αντικαθιστώντας την 4.23 στην 4.22 έχουμε:

$$U(z,t) = A \left(t - \frac{z}{c}\right) \exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{z}{c}\right)\right] \quad (4.24)$$

όπου:

$$A(t) = \sum_q A_q \exp\left(\frac{jq2\pi t}{T_F}\right) \quad (4.25)$$

με  $T_F = 1/f_F$ . Η συνάρτηση  $A(t)$  είναι μια περιοδική συνάρτηση με περίοδο  $T_F$  και αντίστοιχα η συνάρτηση  $A(t - z/c)$  είναι περιοδική ως προς  $z$ . Αν τα πλάτη και οι φάσεις των μιγαδικών  $A_q$  επιλεγθούν κατάλληλα η  $A(t)$  μπορεί να πάρει τη μορφή πολύ στενών περιοδικών παλμών. Έστω ότι έχουμε  $M$  τρόπους ταλάντωσης ( $q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm S$  έτσι ώστε  $M = 2S + 1$ ) με ίσα πλάτη  $A_q = A$  για όλα τα  $q$ . Τότε έχουμε:

$$A(t) = A \sum_{q=-S}^S \exp\left(\frac{j2\pi qt}{T_F}\right) = A \sum_{q=-S}^S x^q = A \frac{x^{S+1} - x^{-S}}{x-1} \quad (4.26)$$



όπου:

$$x = \exp(j2\pi t/T_F)$$

και η οποία καταλήγει στην σχέση:

$$A(t) = A \frac{\sin(M\pi t/T_F)}{\sin(\pi t/T_F)} \quad (4.27)$$

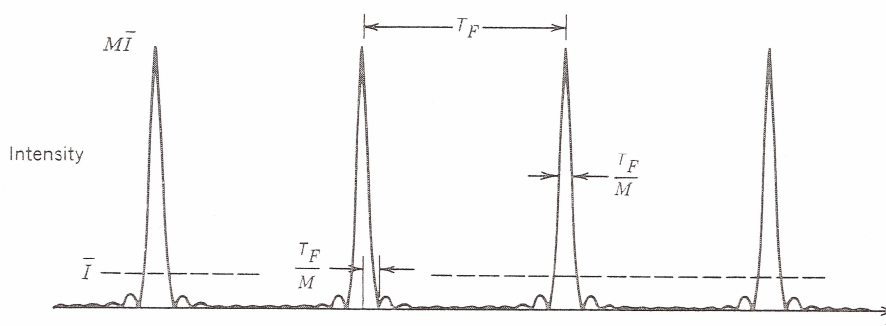
Ενώ η οπτική ένταση δίνεται από:

$$I(t) = |A(t - z/c)|^2$$

με αποτέλεσμα:

$$I(t, z) = |A|^2 \frac{\sin^2[M\pi(t - z/c)/T_F]}{\sin^2[\pi(t - z/c)/T_F]} \quad (4.28)$$

Έπειτα από κατάλληλους υπολογισμούς μπορούμε να βρούμε ότι η μέση ένταση της οπτικής ισχύος είναι  $M$  φορές μεγαλύτερη από αυτή ενός laser στο οποίο δεν έχει εφαρμοστεί η τεχνική του κλειδώματος των τρόπων ταλάντωσης του. Αυτό αναγκάζει τους παλμούς που παράγονται από ένα τέτοιο laser να είναι εξαιρετικά λεπτοί αφού η μορφή τους εξαρτάται από το πλήθος των  $M$  ενεργών τρόπων ταλάντωσης.

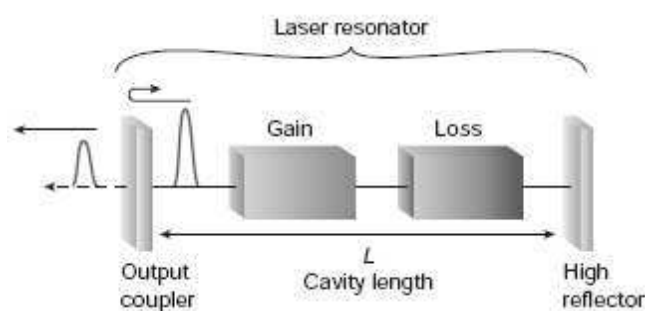


Σχήμα 4.4: Έξοδος Laser με Κλειδωμένους Τρόπους Ταλάντωσης [2]

Η μέθοδος αυτή μπορεί να επιτευχθεί είτε με **Ενεργό Κλείδωμα Τρόπων Ταλάντωσης (Active Mode Locking)** είτε με **Παθητικό Κλείδωμα Τρόπων Ταλάντωσης (Passive Mode Locking)**. Οι δύο περιπτώσεις αυτές ακολουθούν την ίδια μεθοδολογία με τη μόνη διαφορά ότι η πρώτη χρησιμοποιεί ενεργό στοιχείο για το κλείδωμα ενώ η δεύτερη παθητικό.

#### **4.2.2.1 Ενεργό Κλειδώμα Τρόπων Ταλάντωσης (Active Mode Locking)**

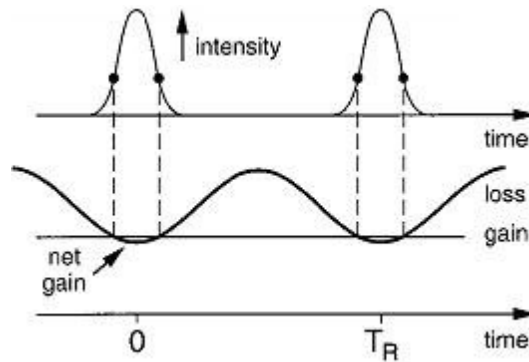
Βασικό στοιχείο που συντελεί στην επίτευξη του Κλειδώματος Τρόπων Ταλάντωσης με ενεργό τρόπο είναι η ύπαρξη ενός **Διαμορφωτή Πλάτους (Amplitude Modulator)** μέσα στην κοιλότητα του laser [3] και πιο συγκεκριμένα κοντά σε ένα από τα κάτοπτρα. Ο διαμορφωτής αυτός λειτουργεί σαν διακόπτης και οδηγείται με συχνότητα τέτοια ώστε να συμπίπτει με την συχνότητα που αντιστοιχεί στο χρόνο πλήρους ταλάντωσης (round trip time) μέσα στην κοιλότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο διαμορφωτής αυτός είναι ένας εξωτερικά ελεγχόμενος Ακουστο – Οπτικός ή Ηλεκτρο – Οπτικός διαμορφωτής. Σε μια οποιαδήποτε κοιλότητα laser δεν υπάρχει ταύτιση μεταξύ των φάσεων των διαφόρων τρόπων ταλάντωσης. Αν οι φάσεις αυτές τυχαία πάρουν ίσες τιμές η φασματική συμβολή των ρυθμών αυτών θα παράγει ένα πολύ λεπτό παλμό ο οποίος δεν θα επηρεάζεται από την παρουσία του διαμορφωτή. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, όπου δηλαδή δεν υπάρχει ταύτιση φάσεων, ο διαμορφωτής δεν επιτρέπει την διέλευση του παλμού στο πεδίο του χρόνου είτε μερικά, είτε ολικά. Έτσι με την παρουσία του διαμορφωτή η μόνη περίπτωση να έχουμε ακτινοβολία είναι να συμβεί η παραπάνω ταύτιση φάσεων αφού αν τύχει και συμβεί αυτό, οι φάσεις παραμένουν κλειδωμένες και το σχήμα του παλμού σταθερό και αναλλοίωτο.



Σχήμα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση κοιλότητας mode locked laser [4]

Η γενική αρχή λειτουργίας ενός laser με Ενεργά Κλειδωμένους Τρόπους Ταλάντωσης είναι η εξής [5]:

Μια συνημιτονοειδής διαμόρφωση ( $q(t) = M(1 - \cos(\Omega_M t))$ ) και συχνότητας  $\Omega_M = \Delta\Omega$  του βασικού ρυθμού (που είναι στη συχνότητα  $\omega_0$ ) μέσω του διαμορφωτή πλάτους, παράγει συνιστώσες σε συχνότητες  $\omega_0 \pm \Delta\Omega$ . Αν αυτές οι συνιστώσες συμπίπτουν με τους ρυθμούς της κοιλότητας κλειδώνουν τους γειτονικούς ρυθμούς, οι οποίοι με τη σειρά τους κλειδώνουν τους γειτονικούς τους κοκ. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη του *mode locking* είναι ο συντονισμός της συχνότητας του διαμορφωτή με το χρόνο επαναφοράς της κοιλότητας.



Σχήμα 4.6: *Actively Mode Locked Παλμός και εξάρτηση του κέρδους* [5]

Έστω  $A_n$  το πλάτος του τρόπου ταλάντωσης που αντιστοιχεί στην συχνότητα  $\omega_0 + n\Delta\Omega$ . Το πλάτος αυτό αλλάζει σε κάθε διέλευση μέσα από την κοιλότητα με απώλειες  $I - L$  και κέρδος  $I + G$ . Τότε:

$$\Delta A_n = \left\{ \frac{G}{1 + \left( \frac{n\Delta\Omega}{\Omega_G} \right)^2} - L \right\} A_n + \frac{1}{2} M (A_{n-1} - 2A_n + A_{n+1}) \quad (4.29)$$

όπου  $M$  η διαμόρφωση και  $\Omega_G$  το εύρος ζώνης του κέρδους υπό κλείδωμα των τρόπων ταλάντωσης. Με την αντικατάσταση του διακριτού φάσματος που αποτελείται από  $n\Delta\Omega$  συνιστώσες με την παράμετρο  $\Omega = n\Delta\Omega$  και του αθροίσματος  $(A_{n-1} - 2A_n + A_{n+1}) / \Delta\Omega^2$  με την δεύτερη παράγωγο, δεδομένου ότι το φάσμα είναι αρκετά πυκνό αναπτύσσοντας το συντελεστή του κέρδους λαμβάνοντας υπόψη μέχρι και δεύτερης τάξης φαινόμενα:

$$\Delta A(\Omega) = (G - L)A(\Omega) - G \left( \frac{\Omega}{\Omega_G} \right)^2 A(\Omega) + \frac{I}{2} M \Omega_m^2 \frac{d^2 A}{d\Omega^2} \quad (4.30)$$

και αγνοώντας τα μεταβατικά φαινόμενα λαμβάνουμε την εξίσωση στην σταθερή κατάσταση:

$$(G - L)A(\Omega) - G \left( \frac{\Omega}{\Omega_G} \right)^2 A(\Omega) + \frac{I}{2} M \Omega_m^2 \frac{d^2 A}{d\Omega^2} = 0 \quad (4.31)$$

Η λύση της εξίσωσης είναι:

$$A(\Omega) = A_0 \exp(-\Omega^2 \tau^2) \quad (4.32)$$

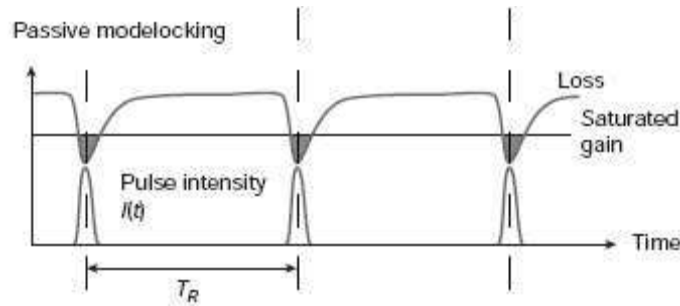
όπου:

$$\tau^4 = \frac{2G}{M \Omega_m^2 \Omega_G^2} \quad (4.33)$$

Έτσι βλέπουμε ότι για ενεργό κλείδωμα τρόπων ταλάντωσης οι παλμοί που παράγονται στην έξοδο έχουν σχήμα παλμών Gauss με παραμέτρους που εξαρτώνται από την κοιλότητα και τα χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης. Εκτός από τα παραπάνω, πρέπει να τονιστεί ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί ενεργό κλείδωμα τρόπων ταλάντωσης και με άλλες μεθόδους, εκτός δηλαδή από την κοινή διαμόρφωση πλάτους, όπως για παράδειγμα με διαμόρφωση φάσης.

#### 4.2.2.2 Παθητικό Κλείδωμα Τρόπων Ταλάντωσης (Passive Mode Locking)

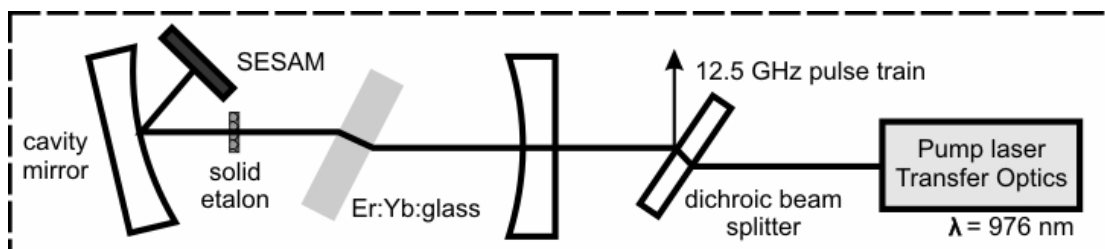
Κλείδωμα των τρόπων ταλάντωσης μιας κοιλότητας laser για την εξαγωγή πολύ λεπτών παλμών μπορεί να επιτευχθεί εκτός από τη χρήση κάποιου ενεργού μέσου και με τη βοήθεια ενός παθητικού στοιχείου όπως για παράδειγμα ένας *Απορροφητής με ικανότητα κορεσμού (Saturable Absorber)*. Αυτός ο απορροφητής παίζει το ρόλο του αντίστοιχου διαμορφωτή και εισάγει απώλειες στην ακτινοβολία της κοιλότητας οι οποίες είναι σχετικά μεγάλες για χαμηλή φωτεινή ένταση, ενώ μειώνονται σημαντικά όταν η ένταση παίρνει μεγάλες τιμές.



Σχήμα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση *passive mode locking*

Έτσι, ένας στενός παλμός προκαλεί μια διαμόρφωση των απωλειών αφού η υψηλή ένταση κορυφής του παλμού βάζει περισσότερο σε κορεσμό τον απορροφητή παρά οι χαμηλής έντασης χρονικές συνιστώσες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια διαμόρφωση των απωλειών με έναν αρχικά γρήγορο κορεσμό αυτών, που ορίζεται από τη διάρκεια των παλμών και συνήθως έναν μεγαλύτερο χρόνο επαναφοράς (recovery time) που εξαρτάται από το μηχανισμό στον οποίο βασίζεται η λειτουργία του απορροφητή. Ο χρόνος επαναφοράς αυτός χωρίζει τη μελέτη των laser με παθητικά κλειδωμένους τρόπους ταλάντωσης σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την ταχύτητα των απορροφητών, στους γρήγορους και τους αργούς. Εν γένει, η περιγραφή των γρήγορων απορροφητών είναι πιο εύκολη από ότι στους αργούς αφού δίνουν αναλυτικές λύσεις με σχετικά απλές προσεγγίσεις.

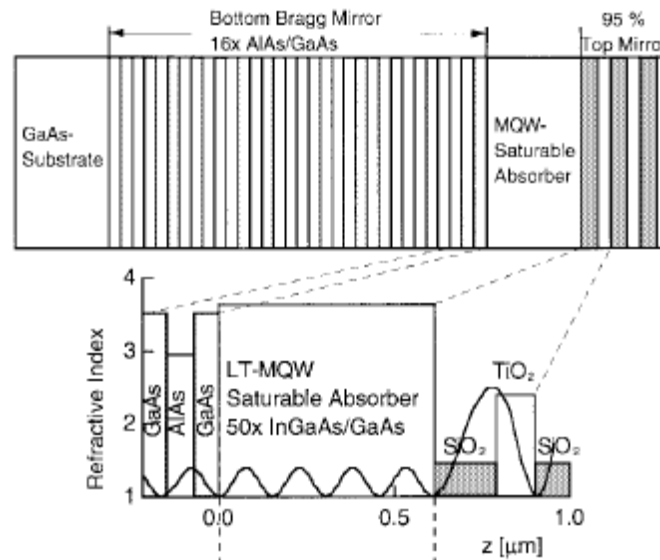
Η κοιλότητα του laser που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.8: Κοιλότητα Laser τύπου ERGO

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένας **Ημιαγωγικός Απορροφητής (SEmiconductor Saturable Absorber Mirror)** [6]. Συνήθως, μια τέτοια διάταξη αποτελείται από ένα κάτοπτρο Bragg

AlAs/GaAs και (κοντά στην επιφάνεια) ένα στρώμα *Απορροφητή Πολλαπλού Κβαντικού Φρέατος (Multiple Quantum Well Absorber)* InGaAs σε υπόστρωμα AlAs όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.9: Τυπική δομή SESAM με τον αντίστοιχο δείκτη διάθλασης [6]

Η αρχή λειτουργίας στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται παθητικό στοιχείο για το κλείδωμα των τρόπων ταλάντωσης είναι η ίδια με αυτή της περίπτωσης του ενεργού στοιχείου με τη διαφορά ότι εδώ ένα παθητικό στοιχείο διαμορφώνει τις απώλειες και όχι το πλάτος ή τη φάση του παλμού. Στην πραγματικότητα το SESAM λειτουργεί ως σχεδόν ιδανικό κάτοπτρο για υψηλές ισχύεις εισόδου και ως απορροφητής για τις αντίστοιχες χαμηλές. Βασική παράμετρος στην σχεδίαση και επιλογή ενός SESAM είναι η ένταση κορεσμού  $I_{sat}$  που δίνεται από τη σχέση [6]:

$$I_{sat} = \frac{hf}{\sigma_A T_A} \quad (4.34)$$

όπου  $hf$  η ενέργεια του φωτονίου,  $\sigma_A$  η ικανότητα απορρόφησης και  $T_A$  ο χρόνος επαναφοράς του απορροφητή. Η σταθερά απορρόφησης είναι:

$$a = \sigma_A N_D \quad (4.35)$$

όπου  $N_D$  η πυκνότητα ατόμων ή ενεργειακών καταστάσεων των ημιαγωγών από τους οποίους αποτελείται το SESAM.

Για την περιγραφή της διάταξης laser χρειάζεται να ορίσουμε τις απώλειες με τη συνάρτηση  $s(t)$ :

$$s(t) = \frac{s_0}{1 + I(t)/I_{sat}} \quad (4.36)$$

όπου  $s_0 (<1)$  οι μη – κορεσμένες απώλειες,  $I(t)$  η σχετική προσπίπτουσα ένταση και  $I_{sat}$  η ένταση κορεσμού του απορροφητή. Αν ο κορεσμός είναι σχετικά ασθενής η παραπάνω σχέση μπορεί να προσεγγιστεί από την:

$$s(t) \approx s_0 (1 - I(t)/I_{sat}) \quad (4.37)$$

Η ισχύς ενός ρυθμού μπορεί να δοθεί από το γινόμενο της έντασης επί την ενεργό επιφάνεια του ρυθμού  $A_{eff}$ . Κανονικοποιώντας το πλάτος του ρυθμού  $A(t)$  ώστε το  $|A(t)|^2$  να αντιστοιχεί σε ισχύ έχουμε:

$$s(t) = s_0 - s_0 \frac{|A(t)|^2}{I_{sat} A_{eff}} = s_0 - \gamma |A(t)|^2 \quad (4.38)$$

όπου  $\gamma$  είναι η σταθερά αυτοδιαμόρφωσης πλάτους. Ορίζοντας:

$$L_0 = L + s_0 \quad (4.39)$$

η γενική μορφή της εξίσωσης είναι:

$$T_R \frac{\partial A(T, t)}{\partial T} = \left[ G - L_0 + D_g \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \gamma |A|^2 + jD_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} - j\delta |A|^2 \right] A(T, t) \quad (4.40)$$

στην οποία λαμβάνονται υπόψη και τα φαινόμενα Διασποράς και Αυτοδιαμόρφωσης φάσης. Για την παράμετρο  $D_g$  ισχύει:

$$D_g = \frac{G}{\Omega_g^2} \quad (4.41)$$

Η (4.40) είναι μια γενική εξίσωση **Ginzburg – Landau**.

Εξετάζουμε αρχικά την περίπτωση χωρίς SPM και GVD ( $D_2 = \delta = 0$ ):

$$T_R \frac{\partial A(T, t)}{\partial T} = \left[ G - L_0 + D_g \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \gamma |A|^2 \right] A(T, t) \quad (4.42)$$

Η εξίσωση αυτή έχει λύσεις της μορφής:

$$A_s(T, t) = A_s(t) = A_0 \operatorname{sech}\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (4.43)$$

και με αντικατάσταση στην εξίσωση έχουμε:

$$\frac{D_g}{\tau^2} = \frac{1}{2} \gamma |A_0|^2 \quad , \quad G = L_0 - \frac{D_g}{\tau^2} \quad (4.44)$$

και από τη σχέση για την ενέργεια των παλμών τύπου  $\text{sech}$ :

$$\tau = \frac{4D_g}{\gamma W} \quad (4.45)$$

Στην περίπτωση όπου ληφθούν υπόψη και τα φαινόμενα GVD και SPM τότε η εξίσωση που πρέπει να μελετηθεί είναι η (4.40) η οποία έχει λύσεις της μορφής:

$$A_s(T, t) = A_0 \text{sech}\left(\frac{t}{\tau}\right) \exp\left[j\beta \ln \text{sech}\left(\frac{t}{\tau}\right) + j\psi T/T_R\right] \quad (4.46)$$

όπου  $\psi$  η μετατόπιση φάσης έπειτα από μια πλήρη ταλάντωση μέσα στην κοιλότητα. Βλέπουμε πως στην περίπτωση αυτή ο παλμός μας έχει κάποιο αρχικό chirp. Με παρόμοιο τρόπο, αντικατάσταση των λύσεων στην αρχική εξίσωση, βρίσκουμε αντίστοιχες σχέσεις με τις (4.44) και (4.45).

### 4.2.3 Κατασκευαστικές παράμετροι του ERGO laser και λειτουργία

Το laser που χρησιμοποιήθηκε είναι του τύπου **ERGO** της **Time – Bandwidth<sup>®</sup>** και σημαντικό ρόλο στην κατασκευή του laser παίζει η χρήση του κρυστάλλου  $\text{Er}^{3+}:\text{Yr}^{3+}$  [7]. Η επιλογή των στοιχείων αυτών ως στοιχεία κέρδους καθορίζεται από το γεγονός ότι τα στοιχεία αυτά, που ανήκουν στην κατηγορία των σπανίων γαιών (rare earth), έχουν φάσμα εκπομπής που αντιστοιχεί στην περιοχή των 1550 nm. Η άντληση της απαραίτητης ενέργειας που πρέπει να παρέχεται στο laser, προέρχεται από μια δίοδο laser που λειτουργεί στα 976 nm και είναι ολοκληρωμένη μέσα στην κοιλότητα. Η διάρκεια του παλμού που πήραμε ήταν **1.9 ps** ενώ ο ρυθμός επανάληψης του laser ήταν **12.5 GHz**. Το εύρος του φάσματος εξόδου είναι περίπου **2,7 nm (337,6 GHz στα 1548,91 nm)**. Η μορφή των παλμών όπως αποδείχθηκε και παραπάνω είναι τύπου  $\text{sech}^2$  όπου η παράμετρος  $\tau$  δίνεται από:



$$T_{FWHM} = 2 \ln(1 + \sqrt{2}) \tau \approx 1.763 \tau$$

$$\tau = \frac{T_{FWHM}}{1.763} = \frac{1.9}{1.763} ps = 1.078 ps$$
(4.47)

Το *Γινόμενο χρόνου – εύρους ζώνης (Time – bandwidth Product)* του παλμού δίνεται από:

$$T_0 * \Delta f$$
(4.48)

Για να μετατρέψουμε το εύρος ζώνης του παλμού από μονάδες μήκους κύματος σε συχνότητα κατά απόλυτες τιμές έχουμε:

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda$$
(4.49)

και με  $\Delta \lambda = 2.7 \text{ nm}$  και  $\lambda = 1548,91 \text{ nm}$  έχουμε  $\Delta f = 337.6 \text{ GHz}$ . Οπότε τελικά το γινόμενο χρόνου – εύρους ζώνης είναι:

$$T_0 * \Delta f = 1.9 ps * 0.3376 THz = 0.64$$
(4.50)

Βλέπουμε ότι το γινόμενο αυτό είναι μεγάλο γεγονός που υποδηλώνει ότι οι αρχικοί παλμοί μας έχουν chirp. Η εύρεση του μετασχηματισμού Fourier των παλμών  $\text{sech}^2$  δεν βρίσκεται σε κλειστή μορφή [8] και έτσι η παραπάνω έκφραση του γινομένου χρόνου – εύρους ζώνης είναι προσεγγιστική αφού ισχύει για τους παλμούς Gauss.

Τα χαρακτηριστικά του ERGO δίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

Εύρος Παλμού	1.9 ps
Κεντρική Συχνότητα	1548.91 nm
Ρυθμός Επανάληψης	12.5 GHz
Ισχύς εξόδου	~10 dBm max
Jitter	~100 fs rms

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά Laser ERGO

### **4.3 Ανάλυση λειτουργίας Οπτικής Ίνας PCF**

Έπειτα από τη παραγωγή του αρχικού παλμού μέσω του ERGO laser, ακολουθεί η δημιουργία του Supercontinuum. Το Supercontinuum στην περίπτωση μας παράγεται με τη βοήθεια μιας **Φωτονικής Κρυσταλλικής Οπτικής Ίνας PCF (Photonic Crystal Fiber)**. Στην συνέχεια της παραγράφου 4.3 αναλύεται η λειτουργία των οπτικών ινών αυτών και παρατίθενται τα στοιχεία της οπτικής ίνας που χρησιμοποιήθηκε.

#### **4.3.1 Δομή οπτικής ίνας PCF**

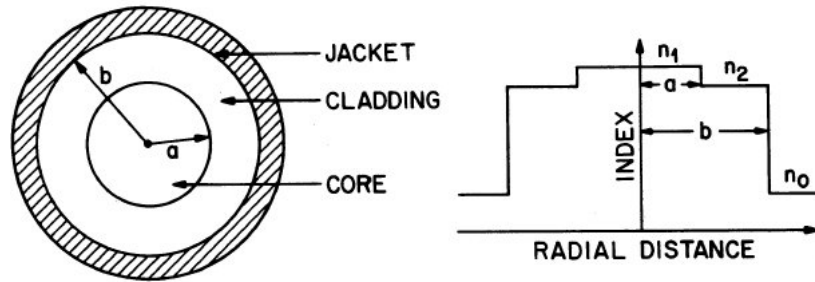
Οι κοινές μονότροπες οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται είτε για τη μετάδοση οπτικών σημάτων, είτε για διάφορες άλλες εφαρμογές, αποτελούνται από δύο περιοχές στις οποίες πραγματοποιείται η κυματοδήγηση, τον πυρήνα και το περίβλημα. Το υλικό από το οποίο αποτελούνται οι περιοχές αυτές είναι κατά βάση το κοινό SiO<sub>2</sub> με τη διαφορά ότι στην πυρήνα περιέχονται και κάποιες προσμίξεις με σκοπό την μικρή αύξηση του δείκτη διάθλασης σε σχέση με το περίβλημα. Η μικρή διαφορά αυτή στους δείκτες διάθλασης ενεργοποιεί το φαινόμενο της **ολικής εσωτερικής ανάκλασης** που είναι και το βασικό φαινόμενο που επιτρέπει την κυματοδήγηση κατά μήκος μιας κοινής SMF οπτικής ίνας. Από το νόμο του Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4.51)$$

αν ισχύει ότι:

$$\theta_1 \geq \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (4.52)$$

τότε έχουμε ολική εσωτερική ανάκλαση. Το προφίλ του δείκτη διάθλασης μιας κοινής SMF ίνας φαίνεται παρακάτω:



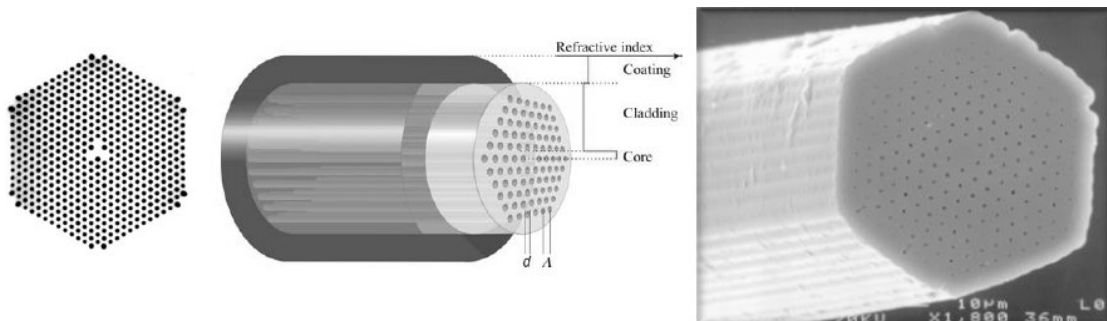
Σχήμα 4.10: Προφίλ δείκτη διάθλασης κοινής SMF ίνας [8]

Ορίζοντας την παράμετρο  $\Delta$  ως εξής:

$$\Delta = \frac{n_{co} - n_{cl}}{n_{cl}} \quad (4.53)$$

όπου  $n_{co}$  ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα και  $n_{cl}$  ο δείκτης διάθλασης του περιβλήματος. Η παράμετρος  $\Delta$  στις SMF ίνες κυμαίνεται σε τιμές που είναι της τάξης του 0.3 – 0.4% με διάμετρο πυρήνα  $d \approx 4,5 \mu m$ . Εκτός από τις κοινές SMF ίνες διάφοροι άλλοι τύποι οπτικών ινών έχουν παρουσιαστεί και χρησιμοποιηθεί οι οποίοι ωστόσο δομικά δεν διαφέρουν από τις κοινές SMF ίνες. Η διαφοροποίηση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια προσμίξεων στον πυρήνα ή αλλαγών στο προφίλ του δείκτη διάθλασης.

Ωστόσο, ένας νέος τύπος οπτικών ινών έχει κάνει την εμφάνισή του τα τελευταία χρόνια, οι Φωτονικές Κρυσταλλικές Ίνες (PCF). Βασική διαφορά των οπτικών ινών αυτών με τις κοινές οπτικές ίνες είναι η διαφορετική δομή τους που επιτυγχάνεται με κατασκευαστικές μεθόδους. Η τομή μιας κοινής PCF ίνας φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.11: Τομή οπτικής ίνας PCF

Η διαφορά των PCF με τις κοινές οπτικές ίνες βασίζεται στο γεγονός ότι το περίβλημα δεν είναι πλέον συμπαγές αλλά διάτρητο και αποτελείται από οπές οι οποίες διατρέχουν την οπτική ίνα αξονικά σε όλο το μήκος της. Μέσα στις οπές αυτές ο δείκτης διάθλασης είναι πρακτικά ίσος με τη μονάδα. Οι αλλαγές στο δείκτη διάθλασης πλέον δεν είναι μονοδιάστατες αλλά γίνονται σε 2 ή και 3 διαστάσεις. Η ακρίβεια με την οποία μπορούν να κατασκευαστούν σήμερα αυτού του τύπου οι οπτικές ίνες είναι της τάξης των 10 nm όταν οι εξωτερικές διαστάσεις είναι της τάξης του 1  $\mu\text{m}$  [9].

Το συγκριτικό πλεονέκτημα των οπτικών ινών αυτών είναι οι δυνατότητες που προσφέρουν για έλεγχο και ρύθμιση των βασικών παραμέτρων τους όπως αυτές της Διασποράς, της μη – γραμμικότητας, του δείκτη διάθλασης και άλλων. Με άλλα λόγια, οι PCF παρέχουν τεράστια ευελιξία στη σχεδίαση τους ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Η δομή των PCF εμφανίστηκε με σκοπό την επίτευξη μιας σημαντικής διαφοράς μεταξύ των δεικτών διάθλασης πυρήνα και περιβλήματος, πράγμα το οποίο στις κοινές ίνες είναι εξαιρετικά δύσκολο. Επιπλέον, οι περιορισμοί που εισάγονται από τις κοινές οπτικές ίνες αφορούν τις εγγενείς μη – γραμμικότητες αλλά και τις απώλειες που απαιτούν διαρκή ενίσχυση του μεταδιδόμενου σήματος.

Οι PCF κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε πειράματα με διάφορες εφαρμογές όπως από την απλή μετάδοση σε σύστημα WDM [10], την κατασκευή οπτικών ενισχυτών [11] αλλά και τη δημιουργία Supercontinuum.

Δύο από τις πλέον θεμελιώδεις παραμέτρους για την σχεδίαση των PCF είναι οι παράμετροι  $d$  και  $A$  που συμβολίζουν τη διάμετρο των οπών και την απόσταση μεταξύ τους αντίστοιχα, ενώ ιδιαίτερα καθοριστικός είναι και ο λόγος  $d/A$ .

#### **4.3.2 Ανάλυση Οπτικών Ινών PCF**

Η εξαιρετικά περίπλοκη δομή των PCF κάνει την ανάλυση τους ένα αρκετά δύσκολο ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα. Παρακάτω

εξετάζονται η κυματοδότηση σε PCF, η εξασθένιση αλλά και τα διάφορα γραμμικά και μη – γραμμικά φαινόμενα.

#### **4.3.2.1 Κυματοδότηση σε PCF**

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{h}_T(x, y) = \bar{x}h_x(x, y) + \bar{y}h_y(x, y)$  είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 h_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h_x}{\partial x^2} - \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial y} \left( \frac{\partial h_x}{\partial y} - \frac{\partial h_y}{\partial x} \right) + (\varepsilon k^2 - \beta^2) h_x &= 0 \\ \frac{\partial^2 h_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_y}{\partial y^2} - \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial x} \left( \frac{\partial h_x}{\partial y} - \frac{\partial h_y}{\partial x} \right) + (\varepsilon k^2 - \beta^2) h_y &= 0 \end{aligned} \quad (4.54)$$

Στις εξισώσεις αυτές η διηλεκτρική σταθερά  $\varepsilon = \varepsilon(x, y)$  δεν είναι σταθερή στο επίπεδο  $(x, y)$  της PCF και ούτε έχει το βηματικό προφίλ που απαντάται στις κοινές SMF, αλλά μεταβάλλεται περιοδικά στο περίβλημα, ενώ μπορεί να είναι σταθερή στον πυρήνα. Μια προσέγγιση που μπορεί να επιχειρηθεί είναι αρχικά να αγνοηθούν οι μεσαίοι όροι στις παραπάνω εξισώσεις οπότε θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 h_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h_x}{\partial x^2} + (\varepsilon k^2 - \beta^2) h_x &= 0 \\ \frac{\partial^2 h_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_y}{\partial y^2} + (\varepsilon k^2 - \beta^2) h_y &= 0 \end{aligned} \quad (4.55)$$

Οι λύσεις αυτές που προκύπτουν είναι παρόμοιες με αυτές των κοινών SMF οπτικών ινών και χρησιμεύουν στην παραμετροποίηση του αρχικού προβλήματος. Η γενικευμένη παράμετρος  $V$  δίνεται από:

$$V_{gen} = k\Lambda \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4.56)$$

και μπορεί να διατηρηθεί σταθερή. Αυτό έχει τεράστια σημασία για αυτού του τύπου τις ίνες αφού ακόμη και για μηδαμινές διαφορές της υπόριξης ποσότητας, με την αύξηση της απόστασης  $\Lambda$  μεταξύ των οπών είναι εφικτή η διατήρηση των ίδιων ρυθμών μέσα στην οπτική ίνα. Έτσι στην σχεδίαση των PCF εισάγεται και άλλη μια παράμετρος που έχει να κάνει με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της και όχι με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη.

Η παράμετρος  $\beta$  είναι αυτή που καθορίζει τα χαρακτηριστικά της κυματοδότησης και αν για αυτήν ισχύει:

$$k < \beta < kn_g \quad (4.57)$$

όπου  $n_g$  ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού τότε το φως διαδίδεται στις συμπαγείς περιοχές και εξασθενεί στις οπές. Η μέγιστη τιμή του δείκτη διάθλασης δίνεται από:

$$n_{\max} \rightarrow \sqrt{(1-F)n_g^2 - Fn_a^2} \quad (4.57)$$

όπου  $F$  το ποσοστό της επιφάνειας που καλύπτεται από αέρα και  $n_a$  ο δείκτης διάθλασης του υλικού των οπών που στην περίπτωση μας είναι 1. Ορίζοντας τις κανονικοποιημένες παραμέτρους  $u$  και  $v$  ως:

$$u = \Lambda \sqrt{k^2 n_g^2 - \beta^2}, \quad v = k \Lambda \sqrt{n_g^2 - 1} \quad (4.58)$$

για τριγωνικό πλέγμα η εξίσωση που προκύπτει από την συνθήκη κυματοδότησης είναι:

$$\begin{aligned} wI_1(a_n w)(J_1(bu)Y_0(a_n u) - J_0(a_n u)Y_1(bu)) + \\ uI_0(a_n w)(J_1(bu)Y_1(a_n u) - J_1(a_n u)Y_1(bu)) = 0 \end{aligned} \quad (4.59)$$

όπου  $a_n = d/2\Lambda$ ,  $b = (\sqrt{3}/2\pi)^{1/2}$  και  $u^2 + w^2 = v^2$ .

Από την παραπάνω συνθήκη κυματοδότησης μπορεί να προκύψει μια πολυωνυμική σχέση μεταξύ  $u$  και  $v$  και με τη βοήθεια αυτής να υπολογιστεί η σχέση για τον μέγιστο δείκτη διάθλασης.

Ορισμένα φαινόμενα κυματοδότησης μπορούν να περιγραφούν στις PCF με τη βοήθεια ενός μοντέλου που υπολογίζει έναν μέγιστο ισοδύναμο δείκτη διάθλασης για το περίβλημα με βάση την παραπάνω ανάλυση. Παρά το γεγονός ότι το μοντέλο αυτό στερείται λεπτομέρειας δίνει μια πρώτη εκτίμηση για τη βασική διαφορά στη συμπεριφορά των PCF με τις SMF [12]: *Ενώ οι SMF ίνες έχουν μια βηματική διαφορά μεταξύ δείκτη διάθλασης πυρήνα και περιβλήματος που είναι πρακτικά σταθερή για όλες τις συχνότητες, κάτι αντίστοιχο δεν ισχύει και για τις PCF. Αυτό συμβαίνει επειδή το φως «αποφεύγει» καλύτερα τις οπές σε μικρότερα μήκη κύματος και έτσι ο ενεργός δείκτης διάθλασης προσεγγίζει αυτόν του βασικού υλικού από το οποίο αποτελείται. Στις*

κοινές PCF με αν ο λόγος  $d/\Lambda < 0.43$  (ισοδύναμη συνθήκη με  $V < 2.405$  που ισχύει σε SMF) το παραπάνω φαινόμενο εξαναγκάζει την οπτική ίνα σε μονορρυθμική λειτουργία για όλες τις συχνότητες [13]. Είναι εξαιρετικά σημαντικό το γεγονός ότι η συνθήκη μονορρυθμικής λειτουργίας στην περίπτωση αυτή είναι ανεξάρτητη της συχνότητας.

#### 4.3.2.2 Εξασθένιση σε PCF

Όπως είναι γνωστό οι οπτικές ίνες εμφανίζουν εξαιρετική συμπεριφορά σε θέματα απωλειών σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο κυματοδηγό και οποιοδήποτε άλλο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Οι τυπικές τιμές των απωλειών στις κοινές SMF ίνες είναι της τάξης των 0.2 dB/km. Στις PCF ίνες οι βασικοί μηχανισμοί που προκαλούν απώλειες είναι δύο:

- A. Το ποσοστό του φωτός που συγκεντρώνεται μέσα στο γυαλί, δηλαδή το ποσοστό της οπτικής ενέργειας που παραμένει σε κυματοδηγούμενες περιοχές της ίνας.
- B. Η τραχύτητα των διεπιφανειών μεταξύ αέρα και γυαλιού που προκαλεί φαινόμενα σκέδασης.

Αν και έχει δειχθεί PCF ίνα με απώλειες ως και 0.28 dB/km [14], η υστέρηση των PCF έναντι των SMF σε θέματα απωλειών δεν έχει επιτρέψει ακόμη τη χρησιμοποίησή τους ως μέσο μετάδοσης για μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, το μέλλον των ινών αυτών φαίνεται εξαιρετικά ευοίωνο αφού είναι θεωρητικά εφικτό να επιτευχθούν οπτικές ίνες με απώλειες μικρότερες ακόμη και από αυτές των κοινών SMF, ιδιαίτερα για PCF με πυρήνα που αποτελείται από αέρα (hollow core).

Επιπλέον, οι συμβατικές ίνες εμφανίζουν απώλειες και λόγω κάμψεων αν καμφθούν πάνω από μια κρίσιμη ακτίνα  $r_c$ . Η ακτίνα αυτή για τις SMF εξαρτάται από το μήκος κύματος, τη διαφορά μεταξύ δείκτη διάθλασης πυρήνα – περιβλήματος (παράμετρος  $\Delta$ ) και την τρίτη

δύναμη της ακτίνας του πυρήνα  $\rho^3$ . Στις PCF η παράμετρος  $\Delta$  παίρνει μεγαλύτερες τιμές από ότι συνήθως και η ακτίνα αυτή μεταβάλλεται ως εξής:

$$r_c \sim \Lambda^3 / \lambda^2 \quad (4.60)$$

Και σε αυτή την περίπτωση οι PCF με πυρήνα κενού υπερτερούν έναντι των άλλων αφού ουσιαστικά δεν παρουσιάζουν καμιά ευαισθησία σε κάμψη.

Ένας άλλος μηχανισμός απωλειών πηγάζει από το γεγονός ότι το περίβλημα δεν μπορεί να θεωρηθεί απείρων διαστάσεων αλλά έχει πεπερασμένες διαστάσεις.

#### **4.3.2.3 Φαινόμενα Διασποράς σε PCF**

Το φαινόμενο της Διασποράς Ταχύτητας Ομάδας (GVD) σε μια κοινή οπτική ίνα ως γνωστόν εξαναγκάζει τις διαφορετικές φασματικές συνιστώσες να ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα ομάδας, λόγω εξάρτησης του δείκτη διάθλασης από τη συχνότητα. Η GVD προκαλεί διεύρυνση ή συμπίεση του παλμού ανάλογα με το πρόσημο της παραμέτρου  $D$  που είναι:

$$D = \frac{\omega^2}{2\pi c u_g^2} \frac{du_g}{d\omega} \quad (4.61)$$

Οι ιδιότητες της διασποράς μπορεί να είναι εξαιρετικής σημασίας σε περιπτώσεις όπου ισχυρή επίδραση κατά την διάδοση έχουν τα μη – γραμμικά φαινόμενα.

Λόγω των πολλών διαφορετικών πιθανών σχεδιάσεων του πλέγματος, της ευελιξίας στην επιλογή των μεγεθών των οπών και της μεγάλης τιμής της παραμέτρου  $\Delta$  παρέχεται μια πληθώρα από πιθανές σχεδιάσεις όσον αφορά τα φαινόμενα της διασποράς.

Ως σήμερα, έχει αποδειχθεί ότι οι PCF μπορούν να παρέχουν οπτικές ίνες μηδενικής διασποράς σε όλο το φάσμα των οπτικών επικοινωνιών που εκτείνεται από το υπέρυθρο ως και το ορατό τμήμα του φάσματος [15]. Επιπλέον, ίνες με επίπεδη διασπορά έχουν κατασκευαστεί που ωστόσο παρουσιάζουν υψηλές απώλειες. Στην



περίπτωση όπου οι οπές είναι αρκετά μεγάλες ο κυματοδηγός μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από μια οπτική ίνα με πυρήνα SiO<sub>2</sub> και περίβλημα που αποτελείται από αέρα απλοποιώντας αρκετά την ανάλυση και τη σχεδίαση τους.

#### **4.3.2.4 Μη – Γραμμικά Φαινόμενα σε PCF**

Τα πολλαπλά μη – γραμμικά φαινόμενα (FWM, SPM, XPM, SRS κτλ) που προέρχονται από την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την ισχύ του παλμού που διαδίδεται μέσα σε μια οπτική είναι παρόντα και στις PCF. Η παράμετρος της μη – γραμμικότητας στην περίπτωση αυτή ορίζεται ως:

$$\gamma = k \sum_i n_2^i / A_{eff}^i = k n_2^{eff} / A_{core} \quad (4.62)$$

όπου  $n_2^i$  ο μη – γραμμικός δείκτης διάθλασης ( $2.9 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$  στον αέρα,  $2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$  για το γυαλί) και  $n_2^{eff}$  ο ενεργός μη – γραμμικός δείκτης διάθλασης. Οι PCF μπορούν να επιδείξουν εξαιρετικά μη – γραμμική συμπεριφορά αλλά και εξαιρετικά γραμμική ανάλογα με την σχεδίαση της εκάστοτε επιθυμητής εφαρμογής. Οι κοινές οπτικές ίνες έχουν επιδείξει συντελεστές μη – γραμμικότητας που είναι της τάξης των  $20 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  στα 1550 nm. Κατά καιρούς έχουν δειχθεί PCF με  $\gamma = 550 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  στα 1550 nm αλλά και με  $\gamma = 0.023 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ .

#### **4.3.2.5 Φαινόμενα Πόλωσης σε PCF**

Σε πολλές από τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται οι PCF είναι εξαιρετικά σημαντική η διατήρηση της πόλωσης κατά τη διάδοση μέσα από μια οπτική ίνα. Καθοριστικός παράγοντας σε αυτό είναι η συμπεριφορά των φαινομένων της **Διπλοθλαστικότητας (Birefringence)** η οποία μπορεί να είναι είτε φυσική, είτε επαγόμενη. Ως Διπλοθλαστικότητα ορίζεται η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την πόλωση του διαδιδόμενου κύματος. Αναλύοντας το πεδίο σε δυο κάθετες πολώσεις, κάθε μία από αυτές μπορεί να «βλέπει»

διαφορετικές τιμές του δείκτη διάθλασης. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα διασπορά του κύματος.

Στις οπτικές ίνες που διατηρούν την πόλωση (Polarization Maintaining) επιθυμούμε μεγάλες τιμές της διπλοθλαστικότητας και αυτό γιατί είναι επιθυμητή η μείωση του μήκους διακροτήματος, δηλαδή της απόστασης στην οποία οι δύο συνιστώσες έχουν αποκτήσει διαφορά φάσης  $2\pi$ . Το μήκος διακροτήματος δίνεται από:

$$L_{beat} = \frac{2\pi}{\beta_x - \beta_y} \quad (4.62)$$

και η παράμετρος της Διπλοθλαστικότητας:

$$B_F = \frac{\beta_x - \beta_y}{2\pi/\lambda} \quad (4.63)$$

Η Διπλοθλαστικότητα εξαρτάται από ποικίλες παραμέτρους όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένη η οπτική ίνα, οι κάμψεις, πιέσεις και δυνάμεις οι οποίες μπορεί να υφίσταται η ίνα και τέλος από εξωτερικά επιβαλλόμενα H/M πεδία. Οι PCF έχουν δείξει μεγάλες τιμές διπλοθλαστικότητας και είναι ιδανικές για κατασκευή PM ινών [16]. Ακόμη, οι ίνες αυτές παρουσιάζουν μια πολύ μεγαλύτερη σταθερότητα στις τιμές της Διπλοθλαστικότητας λόγω του ότι παρουσιάζουν περίπου 100 φορές μικρότερη ευαισθησία σε μεταβολές της θερμοκρασίας.

### **4.3.3 Εφαρμογές Οπτικών Ινών PCF**

Όπως φάνηκε από τα προηγούμενα οι PCF είναι ένα νέο είδος οπτικών ινών το οποίο παρουσιάζει κάποιες εξαιρετικές ιδιότητες οι οποίες οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ευελιξία που παρέχεται κατά τη σχεδίαση και αναμένεται να αντικαταστήσουν σε διάφορες εφαρμογές τις παραδοσιακές οπτικές ίνες. Το φάσμα των εφαρμογών αυτών είναι ευρύτατο. Μερικές από τις σημαντικότερες παρατίθενται παρακάτω:

#### **4.3.3.1 Μετάδοση Παλμών Υψηλής Ισχύος**

Οι PCF, όπως προαναφέρθηκε, έχουν την ικανότητα να παραμένουν μονορυθμικές σε όσα από τα μήκη κύματος μπορούν να υποστηρίξουν. Επιπρόσθετα, η συνδυαστική δράση μη – γραμμικότητας και διασποράς με την κατάλληλη σχεδίαση μπορεί να υποστηρίξει τη μετάδοση σολιτονίων με διάρκεια παλμών της τάξης των 100 fs και ισχύ κορυφής της τάξης των μερικών MW [17]. Τα παραπάνω έχουν σαν επακόλουθο το γεγονός ότι οι PCF μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την επίδοση των συστημάτων μετάδοσης είτε με την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, είτε με την αύξηση της ισχύος αυξάνοντας έτσι την απόσταση μετάδοσης χωρίς επίδραση μη – γραμμικότητας και διασποράς. Ωστόσο, περιοριστικός παράγοντας και πάλι παραμένουν οι απώλειες.

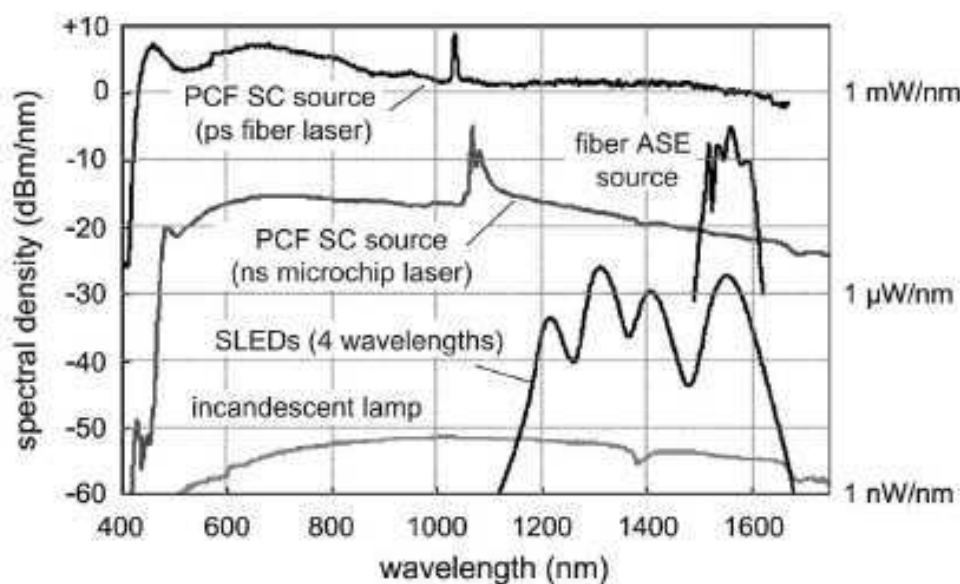
#### **4.3.3.2 Laser Οπτικών Ινών και Ενισχυτές**

Οι οπτικές ίνες PCF μπορούν να επιδείξουν πολύ μεγάλο βήμα δείκτη διάθλασης και υψηλό Αριθμητικό Παράθυρο (Numerical Aperture). Αποτέλεσμα αυτού, είναι η δυνατότητα τους να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οπτικές ίνες για την κατασκευή laser ινών (fiber lasers). Μια δίοδος laser χρησιμοποιείται για την άντληση της οπτικής ισχύος παράγοντας πολυρυθμικό φάσμα. Η οπτική ίνα μπορεί να απορροφήσει μεγάλο μέρος της οπτικής ισχύος λειτουργώντας μονορυθμικά [18].

Εκτός όμως από την κατασκευή laser οι PCF μπορούν να χρησιμεύσουν στην κατασκευή αμιγώς οπτικών ενισχυτών με προσμίξεις σπάνιων γαιών ή τύπου Raman. Επιπλέον, είναι δυνατή η χρήση τους σε σχήματα ενίσχυσης παλμών με chirp κατά το τελευταίο στάδιο λόγω της εξαιρετικής ικανότητάς τους για ρύθμιση της διασποράς.

### 4.3.3.3 Δημιουργία Supercontinuum

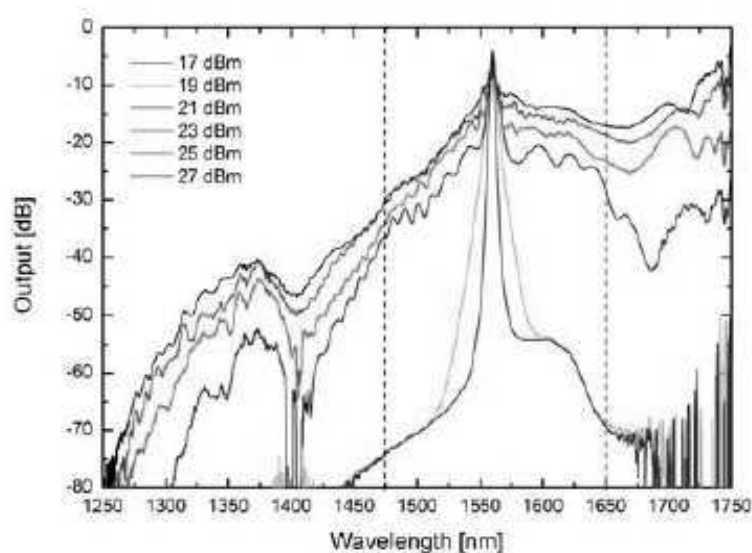
Μια από τις πλέον σπουδαίες εφαρμογές των PCF είναι η παραγωγή Supercontinuum. Το ευρύ φάσμα που δημιουργείται κατά τη διάδοση στενών παλμών μέσα από μια PCF είναι πολύ καλής ποιότητας, έχει πολύ σημαντικές ιδιότητες και βρίσκει πολλές εφαρμογές όπως σε **Οπτική Τομογραφία Συνοχής Φάσης (Optical Coherence Tomography)** [19], **Μετρολογία Συχνοτήτων** [20], **Φασματική Πηγή για Οπτικές Επικοινωνίες** [21],[22] και **Φασματοσκοπία** [23]. Παρακάτω φαίνονται τα φάσματα που προκύπτουν με τη βοήθεια διαφόρων μέσων, όπως μέσω PCF με παλμούς picosecond και nanosecond αντίστοιχα, μέσω θορύβου ASE σε οπτικές ίνες, μέσω Superluminescent LED και τέλος μέσω λαμπτήρα πυρακτώσεως:



Διάγραμμα 4.1: Συγκριτικό διάγραμμα δημιουργίας SC μεταξύ PCF και άλλων μέσων [9]

Τα φαινόμενα τα οποία συμμετέχουν στην δημιουργία του Supercontinuum είναι τα μη – γραμμικά φαινόμενα και μάλιστα η συνδυαστική δράση αυτών. Η διαδικασία πίσω από τη δημιουργία του Supercontinuum στις οπτικές ίνες μπορεί να διαφέρει αρκετά ανάλογα

με τη διασπορά, την ισχύ κορυφής και τη διάρκεια του παλμού. Όταν παλμοί με εύρος της τάξης των femtosecond χρησιμοποιούνται, η φασματική εξάπλωση κυριαρχείται από την παρουσία της SPM. Για παλμούς εισόδου στο πεδίο των picosecond, όπως στην περίπτωση μας, τα κύρια φαινόμενα που επιδρούν είναι η FWM και η SRS. Ωστόσο, λόγω της συνδυαστικής επίδρασης όλων αυτών των φαινομένων δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί το φάσμα εξόδου που προκύπτει από τη διάδοση παλμών μέσα από μια PCF. Παρακάτω παρατίθεται διάγραμμα που απεικονίζει το φάσμα που προκύπτει για διάφορες τιμές της μέσης ισχύος εισόδου από 17 ως 27 dBm. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται η διαφορά στην επίδραση των μη – γραμμικών φαινομένων που παράγουν το Supercontinuum ανάλογα με την ισχύ εισόδου:



*Διάγραμμα 4.2: Supercontinuum που προέρχεται από PCF για διάφορες τιμές της ισχύος εισόδου. Το εύρος των παλμών εισόδου είναι 2 ps. [24]*

Από το σχήμα 4.13 βλέπουμε ότι για χαμηλότερες τιμές της ισχύος εισόδου το φαινόμενο που κυριαρχεί είναι η SRS αφού και το φάσμα είναι το τυπικό της απολαβής Raman. Σε υψηλότερες ισχύεις ωστόσο, εντονότερη είναι η παρουσία της FWM και αυτό μπορεί να φανεί από τις δύο κορυφές που γεννιούνται.

Το συγκριτικό πλεονέκτημα των PCF έναντι των κοινών οπτικών ινών στη δημιουργία του Supercontinuum είναι το ότι δεν χρειάζονται

τόσο μεγάλες ισχύεις κορυφής εισόδου. Σε σύγκριση με αυτές η απαιτούμενη ισχύς κορυφής είναι δύο τάξεις μεγέθους περίπου χαμηλότερες [25].

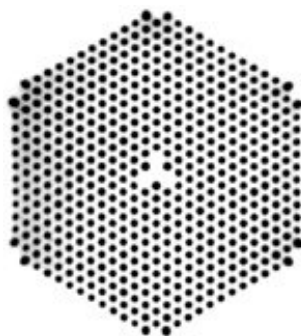
#### **4.3.4 Χαρακτηριστικά της PCF του πειράματος**

Η PCF που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη είναι του τύπου *NL - 1550 - POS - 1* της *Crystal Fibre*<sup>®</sup> σε δύο διαφορετικά μήκη: 50 και 100 m. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα φυσικά χαρακτηριστικά της PCF:

Υλικό κατασκευής	SiO <sub>2</sub>
Διάμετρος Περιβλήματος	<b>128 ± 5 μm</b>
Διάμετρος Επένδυσης	<b>250 ± 5 μm</b>
Υλικό Επένδυσης (Μονό Στρώμα)	Ακρυλικό
Διάμετρος Πυρήνα	<b>2.1 ± 0.3 μm</b>

*Πίνακας 4.2: Φυσικά Χαρακτηριστικά της PCF*

Πρέπει να τονίσουμε ότι ο πυρήνας είναι τριγωνικού σχήματος και αυτή είναι η μέση διάμετρος του, όπως φαίνεται στο σχήμα:



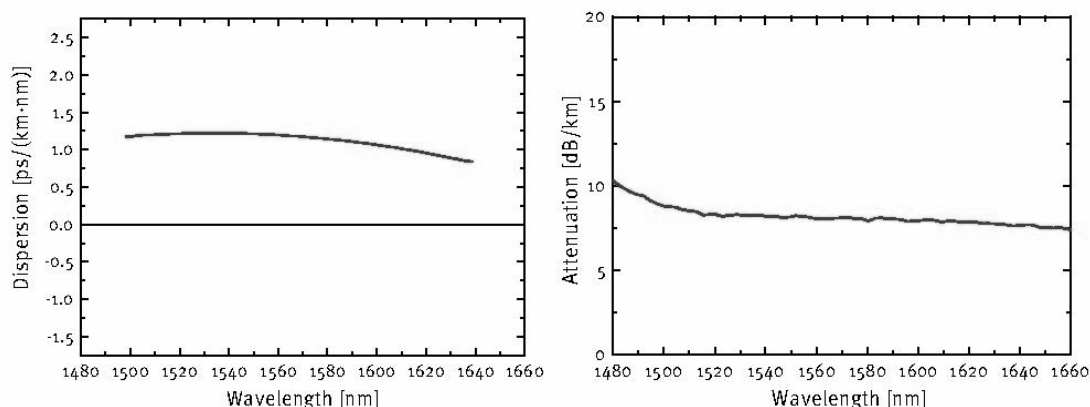
*Σχήμα 4.12: Τομή της PCF του πειράματος*

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα οπτικά χαρακτηριστικά της PCF:

Διασπορά <b>D</b> (1480 – 1620 nm)	> <b>0.5</b> ps/nm/km
Διασπορά <b>D</b> (1480 – 1620 nm)	< <b>1.5</b> ps/nm/km
Εξασθένιση <b>a</b> (1510 – 1620 nm)	< <b>9</b> dB/km
Διάμετρος Κυματοδηγούμενου Ρυθμού (1550 nm)	<b>2.8 ± 0.5</b> μm
Αριθμητικό Παράθυρο <b>NA</b> (1550 nm)	<b>0.40 ± 0.05</b>
Συντελεστής Μη – Γραμμικότητας $\gamma$ (1550 nm)	<b>~11</b> W <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup>
Απώλειες λόγω συγκολλήσεων	< <b>0.5</b> dB

Πίνακας 4.3: Οπτικά Χαρακτηριστικά της PCF

Ακολούθως παρατίθενται τα διαγράμματα διασποράς και απωλειών της PCF:



Διάγραμμα 4.3: Καμπύλες Διασποράς και Εξασθένισης της PCF (1480 – 1660 nm)

Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε πως η εξασθένιση παραμένει αρκετά σταθερή για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων ενώ το ίδιο ισχύει και για τη διασπορά, που σημαίνει ότι ο παράγοντας  $\beta_3$  της διασποράς τρίτης τάξης παίρνει πολύ χαμηλές τιμές.

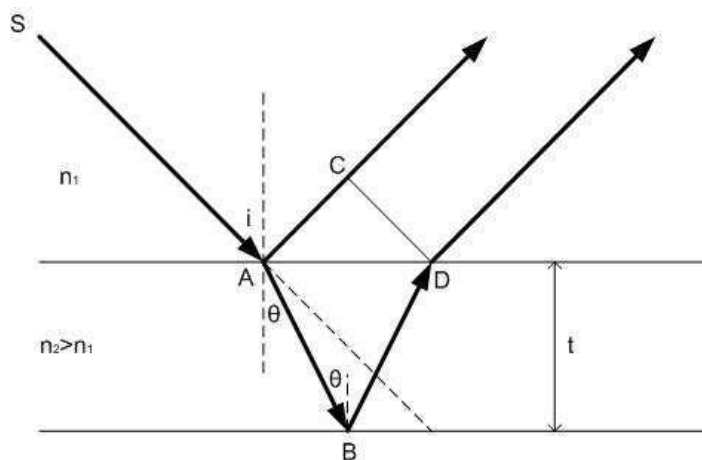
#### 4.4 Ανάλυση λειτουργίας Συμβολόμετρου Fabry – Péro

Το τελικό και ιδιαίτερα καθοριστικό στάδιο της αμιγούς οπτικής πολυκυματικής πηγής είναι το Συμβολόμετρο Fabry – Péro. Στο στάδιο

αυτό γίνεται ο Φασματικός Διαχωρισμός (Spectral Slicing) των DWDM καναλιών διαιρώντας το Supercontinuum που έχει παραχθεί μέσω της PCF. Ακολούθως, εξηγείται η λειτουργία του συμβολομέτρου Fabry – Péroτ όπως επίσης και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του.

#### 4.4.1 Θεωρία Συμβολής Η/Μ Κυμάτων με Διαίρεση Πλάτους

Έστω ότι μια μονοχρωματική ακτίνα φωτός διαδίδεται σε μέσο με δείκτη διάθλασης  $n_1$  και προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ  $n_1$  και  $n_2$  με  $n_2 > n_1$  υπό γωνία  $i$ . Λόγω του ότι το μέσο 2 είναι οπτικά πυκνότερο, στο σημείο A, ένα μέρος του φωτός διαθλάται και διαδίδεται υπό γωνία  $\theta$  ως προς τον αρχικό άξονα όπου  $\theta < i$ , ενώ το υπόλοιπο ανακλάται στο αρχικό μέσο υπό γωνία  $i$ . Η πλάκα με δείκτη διάθλασης  $n_2$  έχει πάχος  $t$  και όταν η ακτίνα φτάσει στην διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ  $n_1$  και  $n_2$  το ίδιο φαινόμενο επαναλαμβάνεται στο σημείο B.



Σχήμα 4.13: Φαινόμενα Συμβολής που προκαλούνται από Διαίρεση Πλάτους

Η ανακλώμενη ακτίνα από το σημείο B τελικά προσπίπτει στην αρχική επιφάνεια στο σημείο D όπου και διαδίδεται παράλληλα στην C. Αν θεωρήσουμε  $n_1=1$  για περισσότερη απλότητα στις πράξεις τότε θα έχουμε:



$$\begin{aligned}
 n_2(AB+BD) - AC &= 2n_2AB - AC \Leftrightarrow \\
 n_2(AB+BD) - AC &= 2nt / \cos \theta - 2t \tan \theta \sin i \Leftrightarrow \\
 n_2(AB+BD) - AC &= \frac{2nt}{\cos \theta} (1 - \sin^2 \theta) = 2nt \cos \theta
 \end{aligned} \tag{4.64}$$

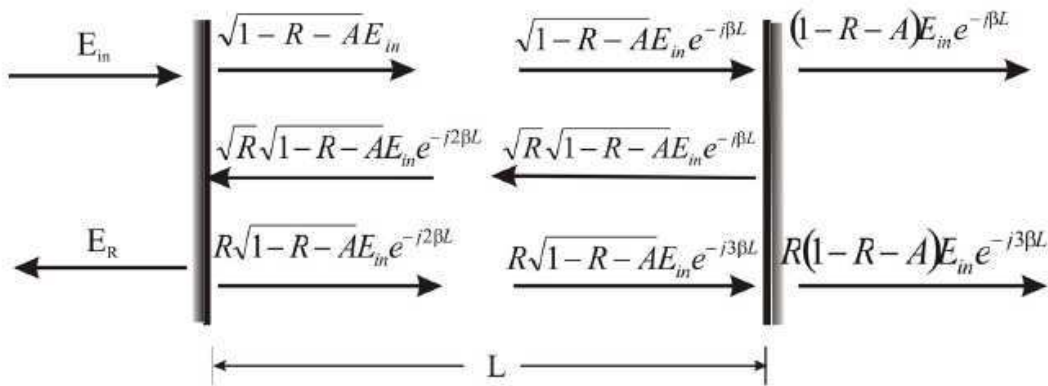
Οπότε η διαφορά δρόμου αυτή εισάγει μια διαφορά φάσης:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2nt \cos \theta \tag{4.65}$$

Αν ισχύει ότι:  $2nt \cos \theta = m\lambda$  όπου  $m$  ακέραιος έχουμε αναιρετική συμβολή ενώ αν  $2nt \cos \theta = (m+1/2)\lambda$  έχουμε ενισχυτική συμβολή.

#### 4.4.2 Δομή Συμβολόμετρου Fabry - Pérot

Το Συμβολόμετρο FP είναι αρκετά απλό στην δομή του και αποτελεί μια συντονισμένη κοιλότητα η οποία βρίσκεται ανάμεσα σε δύο παράλληλα κάτοπτρα υψηλής ανακλαστικότητας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.14: Δομή Κοιλότητας FP και Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου  
έπειτα από κάθε ανάκλαση

Η ανάλυση της λειτουργίας του FP βασίζεται στη θεωρία της Συμβολής με Διαίρεση Πλάτους. Στην πράξη, για να μην παρουσιάζονται ανεπιθύμητοι συντονισμοί από ανακλάσεις μεταξύ των δύο εξωτερικών πλευρών των κατόπτρων, οι εξωτερικές τους επιφάνειες βρίσκονται υπό ελαφριά κλίση και συχνά φέρουν αντιανακλαστική επίστρωση. Ωστόσο, οι εσωτερικές επιφάνειες των κατόπτρων βρίσκονται σε πλήρη

παραλληλισμό. Το εισερχόμενο φως ανακλάται πολλαπλά μέσα στην κοιλότητα και αν το μήκος  $L$  της κοιλότητας είναι ακριβώς:

$$L = \frac{i\lambda}{2n} = \frac{ic}{2nf} \quad (4.66)$$

(όπου  $n$  ο δείκτης διάθλασης μέσα στην κοιλότητα και  $i$  η τάξη συντονισμού), τότε πριν η φωτεινή ένταση εξασθενίσει στο  $1/e$  της αρχικής της τιμής, το φως εκτελεί έναν αριθμό διαδοχικών ανακλάσεων μέσα στην κοιλότητα, ανάλογο προς μία ποσότητα που ονομάζεται **Λεπτότητα (Finesse)**. Όλο σχεδόν το φως περνάει στην έξοδο. Αντίθετα, αν το μήκος της κοιλότητας αποκλίνει από την παραπάνω τιμή, η συμβολή δεν είναι εντελώς θετική, οπότε η ισχύς εξόδου περιορίζεται.

#### 4.4.3 Συνάρτηση Μεταφοράς Συμβολόμετρου Fabry - Péro

Υποθέτουμε ότι ο συντελεστής απωλειών λόγω απορρόφησης κατά τη διέλευση του φωτός μέσα από κάθε κάτοπτρο είναι  $A$  και έστω  $R$  η ανακλαστικότητα ισχύος του κάθε κατόπτρου. Αν το προσπίπτον πεδίο στο συμβολόμετρο είναι:

$$E_{in} = E_0 e^{-j\omega t} \quad (4.67)$$

τότε κατά τη διέλευση από το πρώτο κάτοπτρο έχουμε:

$$E = \sqrt{1-R-A} E_0 e^{-j\omega t} \quad (4.68)$$

ενώ στο δεύτερο κάτοπτρο το πεδίο έχει διανύσει απόσταση  $L$ , οπότε για το πεδίο έχουμε:

$$E_{0T} = (1-R-A) E_0 e^{-j\omega t} e^{-j\beta L} \quad (4.69)$$

ενώ το προς τα πίσω ανακλώμενο μετά την ανάκλαση θα είναι:

$$E_{0R} = \sqrt{R} \sqrt{1-R-A} E_{in} e^{-j\omega t} \quad (4.70)$$

Το πεδίο στη συνέχεια ανακλάται και διαδίδεται σε μήκος  $L$  προς το αριστερό κάτοπτρο και τελικά προς το δεξί και πάλι. Το μεταδιδόμενο πεδίο τώρα θα είναι:

$$E_{1T} = R(1-R-A) E_{in} e^{-j\omega t} e^{-j3\beta L} = R e^{-j2\beta L} E_{1T} \quad (4.71)$$

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για άπειρο χρόνο μέσα στην κοιλότητα και το πεδίο έπειτα από  $m$  πλήρεις ταλαντώσεις είναι:

$$E_{mT} = (R e^{-j2\beta L})^m E_{0T} \quad (4.72)$$

Μετασχηματίζοντας το γινόμενο  $\beta L$  ως εξής:

$$\beta L = \frac{2\pi}{\lambda} L = \frac{2\pi f}{c} L = 2\pi f \left( \frac{L}{c} \right) = 2\pi f \tau \quad (4.73)$$

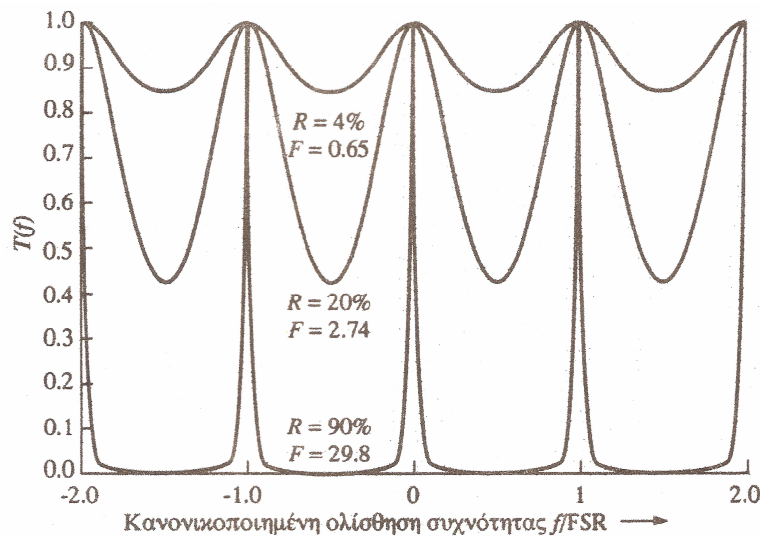
όπου  $\tau$  ο χρόνος μιας πλήρους ταλάντωσης μέσα στην κοιλότητα (round trip time), η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$\begin{aligned} H(f) &= \frac{E_{out}(f)}{E_{in}(f)} = (1-A-R) e^{-j2\pi f \tau} \sum_{m=0}^{\infty} (R e^{-j4\pi f \tau})^m = \\ &= (1-A-R) e^{-j2\pi f \tau} \frac{1}{1-R e^{-j4\pi f \tau}} = (1-A-R) \frac{e^{-j2\pi f \tau}}{1-R e^{-j4\pi f \tau}} \end{aligned} \quad (4.74)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος  $T(f) = H(f)H^*(f) = |H(f)|^2$  είναι:

$$T(f) = \frac{(1-A-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(2\pi f \tau)} \quad (4.75)$$

Η συνάρτηση  $T(f)$  είναι περιοδική και η γραφική παράστασή της φαίνεται στο παρακάτω σχήμα για διάφορες τιμές της ανακλαστικότητας  $R$ :



Διάγραμμα 4.4: Συνάρτηση Μεταφοράς Συμβολόμετρου FP για διάφορες τιμές της ανακλαστικότητας  $R$ .

Σημαντική παράμετρος των Συμβολόμετρων FP είναι η **Ελεύθερη Φασματική Περιοχή (Free Spectral Range)** η οποία αντιστοιχεί στη φασματική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μεγίστων της συνάρτησης μεταφοράς και η οποία δίνεται από:

$$FSR = \frac{1}{2\tau} = \frac{c}{2nL} \quad (4.76)$$

Επιπλέον, μια άλλη παράμετρος της συνάρτησης μεταφοράς των FP είναι το **Εύρος Ημίσειας Ισχύος (Full Width at Half Maximum)** το οποίο είναι:

$$FWHM = \frac{c}{2nL} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}} \quad (4.77)$$

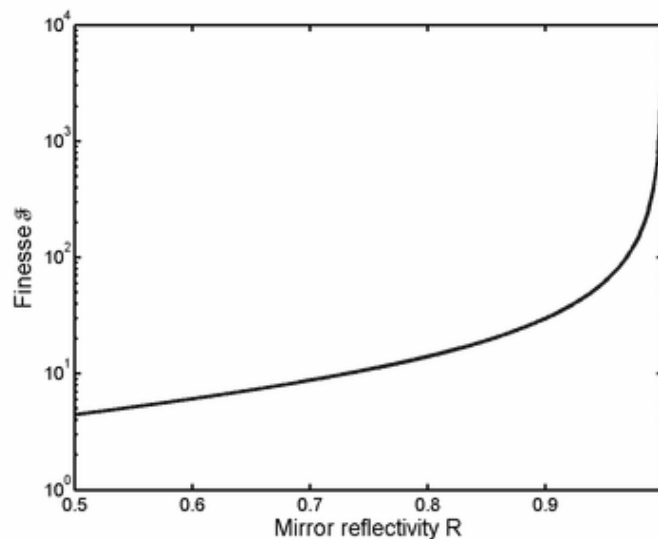
Από τις δυο παραπάνω παραμέτρους προκύπτει η πλέον σημαντική παράμετρος ενός FP η οποία είναι η **Λεπτότητα (Finesse)** και δίνεται από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (4.78)$$

και μπορεί περαιτέρω να προσεγγιστεί από την:

$$F \approx -\frac{\pi}{\ln R} \quad (4.79)$$

Η γραφική παράσταση της παραπάνω συνάρτησης που δείχνει την εξάρτηση της Λεπτότητας από την ανακλαστικότητα δίνεται στο σχήμα 4.19 που ακολουθεί:



Διάγραμμα 4.5: Γραφική Παράσταση της  $F(R)$

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι για συχνότητες τέτοιες ώστε:

$$f_m = \frac{mc}{2nL}, m=1,2,\dots \quad (4.80)$$

έχουμε ενισχυτική συμβολή και το FP λειτουργεί σαν φίλτρο με περιοδικότητα ίση με την FSR.

Η έκφραση 4.73 της συνάρτησης μεταφοράς του FP λαμβάνει υπόψη μόνο τα γραμμικά φαινόμενα χωρίς επιπλέον την επίδραση της διασποράς. Αν ληφθούν και αυτά υπόψη τότε η γενική έκφραση της συνάρτησης μεταφοράς μπορεί να γραφτεί:

$$T_R(f) = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\phi_R/2)} \quad (4.81)$$

όπου  $\phi_R = \phi_0(\omega) + \phi_{NL} = \tilde{\beta}L = (\beta_0(\omega) + \Delta\beta_{NL})L$ . Μια έκφραση της μη - γραμμικής φάσης δίνεται από:

$$\phi_{NL} = \gamma P_{av} L \quad (4.82)$$

#### 4.4.4 Ανάλυση Συμβολόμετρου Fabry - Pérot στο πεδίο του χρόνου

Η έξοδος του FP σε κρουστική απόκριση στο πεδίο του χρόνου δίνεται από:

$$h(t) = (1-R) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} R^n \cdot \delta\left(t - \frac{n}{FSR}\right) \quad (4.83)$$

Από την παραπάνω σχέση βλέπουμε ότι το συμβολόμετρο FP διατηρεί μια ιδιότητα μνήμης αφού για μία χρονικά στιγμιαία απόκριση η έξοδος θεωρητικά επαναλαμβάνεται επ' άπειρον ενώ φθίνει με το  $R^n$  ( $R < 1$ ). Αν θεωρήσουμε ότι η εκθετική μείωση της ισχύος του n - οστού παλμού είναι  $A$  τότε έχουμε:

$$R = \exp\left(\frac{\ln A}{2n}\right) \quad (4.84)$$

τότε με αντικατάσταση της 4.78 στην προηγούμενη και την προσέγγιση  $e^{a/x} = 1 + a/x$  έχουμε:

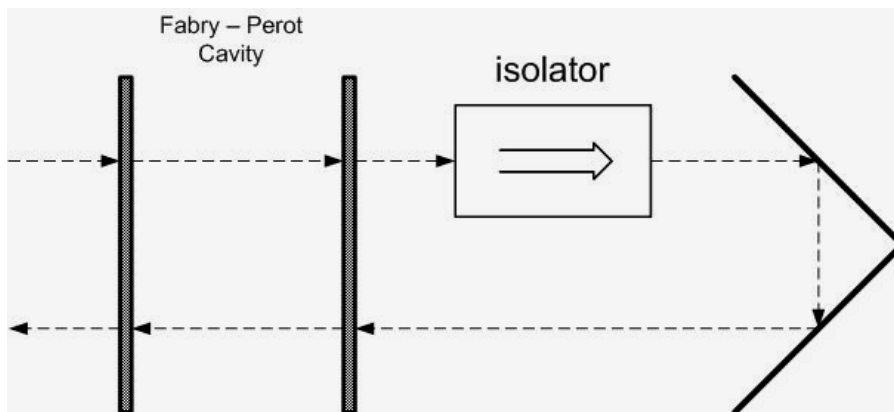
$$F = \frac{2\pi}{\ln A} n + \frac{\pi}{2} \quad (4.85)$$

Η παραπάνω σχέση είναι σημαντική για τον υπολογισμό του κατάλληλου συμβολόμετρου FP το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού.

#### 4.4.5 Διπλή Διέλευση από Συμβολόμετρο Fabry - Péro

Για τη βελτίωση του ποιότητας του φιλτραρίσματος με τη βοήθεια ενός FP είναι δυνατή η διέλευση του οπτικού σήματος μέσα από το ίδιο συμβολόμετρο περισσότερες από μια φορές. Παρ' όλα αυτά, η διέλευση πάνω από δύο φορές εισάγει σημαντικές απώλειες και για το λόγο αυτό δεν εξετάζεται.

Η διάταξη με την οποία γίνεται η **Διπλή Διέλευση (Double Passing)** μέσα από ένα FP φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.15: Διάταξη για Διπλή Διέλευση μέσα από μια κοιλότητα Fabry - Péro

Γράφοντας την συνάρτηση μεταφοράς υπό τη μορφή:

$$T_{sp}(f) = \frac{1}{1 + \left( \frac{2\sqrt{R}}{1-R} \sin\left(\frac{\pi f}{FSR}\right) \right)^2} \quad (4.86)$$

η συνάρτηση μεταφοράς της διπλής διέλευσης θα είναι:

$$T_{dp}(f) = T_{sp}^2(f) = \frac{1}{\left( 1 + \left( \frac{2\sqrt{R}}{1-R} \sin\left(\frac{\pi f}{FSR}\right) \right)^2 \right)^2} \quad (4.87)$$

Το εύρος ζώνης του φίλτρου για την πρώτη περίπτωση είναι:

$$BW_{sp} = \frac{2FSR}{\pi} \sin^{-1} \left[ \frac{(1-R)}{2\sqrt{R}} \right] \quad (4.88)$$

και με την παραδοχή ότι  $\frac{BW_{sp}}{FSR} \ll 1$  έχουμε την προσέγγιση:

$$BW_{sp} \simeq \frac{2FSR}{\pi} \left[ \frac{(1-R)}{2\sqrt{R}} \right] \quad (4.89)$$

Ομοίως και στην περίπτωση της διπλής διέλευσης έχουμε [26]:

$$BW_{dp} = \frac{2FSR}{\pi} \sin^{-1} \left[ \sqrt{\sqrt{2}-1} \frac{(1-R)}{2\sqrt{R}} \right] \simeq \frac{2FSR}{\pi} \left[ \sqrt{\sqrt{2}-1} \frac{(1-R)}{2\sqrt{R}} \right] = (\sqrt{\sqrt{2}-1}) BW_{sp} \quad (4.90)$$

Έτσι βλέπουμε ότι ενώ έχουμε βελτίωση της Λεπτότητας του φίλτρου υπάρχει ταυτόχρονα και μια μείωση του εύρους ζώνης του φίλτρου της τάξης του  $\sim 0.64$ .

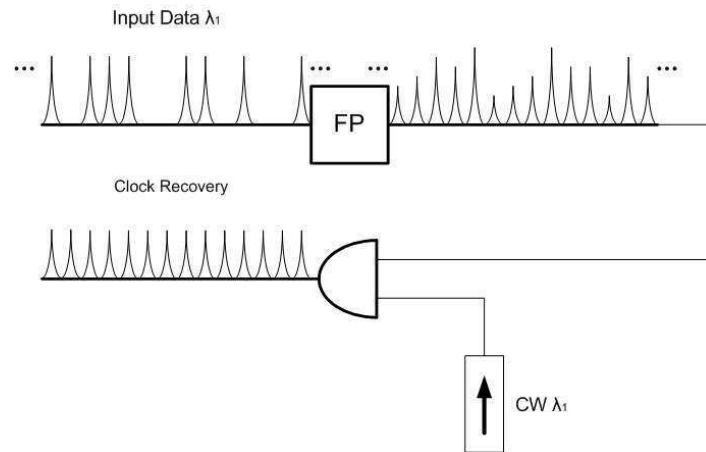
Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξή μας και έδωσε μια αξιόλογη βελτίωση στα πειραματικά αποτελέσματα.

#### **4.4.6 Εφαρμογές Συμβολόμετρου Fabry - Pérot**

Το Συμβολόμετρο FP έχει πολλαπλές εφαρμογές στην οπτική τεχνολογία λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του. Οι εφαρμογές αυτές μπορούν είτε να εκμεταλλεύονται τις ιδιότητες του FP στο πεδίο του χρόνου, είτε στο πεδίο της συχνότητας. Μερικές από αυτές είναι:

##### **4.4.6.1 Ανάκτηση Ρολογιού**

Το συμβολόμετρο FP χρησιμοποιείται σε κυκλώματα ανάκτησης του ψηφιακού ρολογιού σε μετάδοση δεδομένων σε οπτικά δίκτυα. Η ιδιότητα της μνήμης που αυτό παρέχει, δημιουργεί χρονικά αντίγραφα των παλμών εισόδου της ασύγχρονης κίνησης που εισάγεται σε αυτό [27].



Σχήμα 4.16: Κύκλωμα Ανάκτησης Ρολογιού με χρήση Fabry - Péro

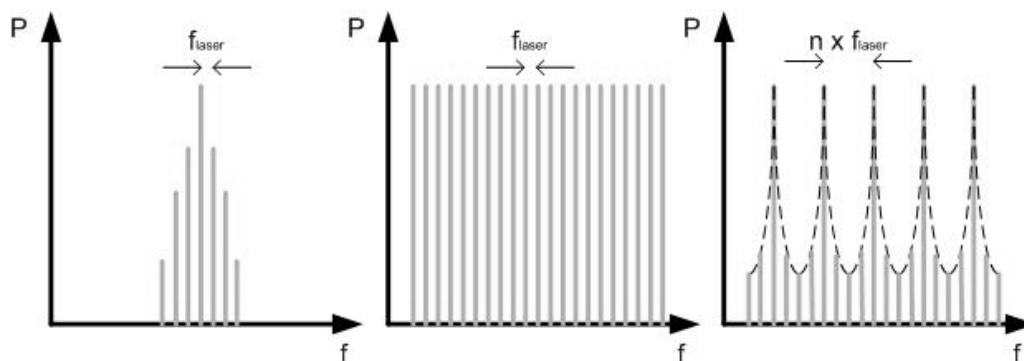
Το κύκλωμα ψαλιδισμού που ακολουθεί ανακτά τους παλμούς ρολογιού. Οι προϋποθέσεις που απαιτούνται για το κύκλωμα αυτό είναι:

- A. Μια φασματική κορυφή του FP να συμπίπτει με το μήκος κύματος μετάδοσης των δεδομένων.
- B. Η Ελεύθερη Φασματική Περιοχή να είναι ίση με το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
- C. Το φασματικό εύρος των αρμονικών συνιστωσών της πηγής δεδομένων να είναι μικρότερο του εύρους ζώνης των φασματικών κορυφών μετάδοσης του φίλτρου.

#### 4.4.6.2 Αύξηση του Ρυθμού Επανάληψης

Με την πειραματική διάταξη που έχουμε δείξει ως τώρα, εκτός από τη δημιουργία μιας πολυκυματικής πηγής, είναι εφικτή και η **Αύξηση του ρυθμού επανάληψης (Repetition rate upgrade)** μιας πηγής laser [28]. Στην τεχνική αυτή, ένα φάσμα με απόσταση αρμονικών  $f$ , που είναι αντίστροφη του ρυθμού επανάληψης, αν διέλθει μέσα από ένα συμβολόμετρο FP με FSR ακέραιο πολλαπλάσιο του  $f$  (έστω  $n*f$ ) τότε παραμένουν στην έξοδο μόνο οι αρμονικές που είναι ακέραια πολλαπλάσια του  $n*f$ .





Σχήμα 4.17: Αύξηση του ρυθμού Επανάληψης

#### 4.4.6.3 Επιλογή Καναλιών Πολυκυματικών Πηγών

Με το παραπάνω σχήμα εκτός από αναβάθμιση του ρυθμού επανάληψης μιας δεδομένης πηγής, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί και μια Πολυκυματική πηγή laser που παράγει πολλά κανάλια με σταθερή φασματική απόσταση μεταξύ τους ίση με FSR. Ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί στην επιλογή του FP το οποίο όχι μόνο θα πρέπει να είναι συντονισμένο στις αρμονικές της αρχικής πηγής αλλά και στο πλέγμα της ITU που ορίζει ακριβώς τα κανάλια μετάδοσης με φασματική απόσταση μεταξύ τους 50 και 100 GHz.

#### 4.4.7 Χαρακτηριστικά Συμβολόμετρων Fabry – Péroτ του πειράματος

Τα συμβολόμετρα Fabry – Péroτ που χρησιμοποιήθηκαν είναι της *SLS Optics*<sup>®</sup> με FSR 50 και 100 GHz. Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

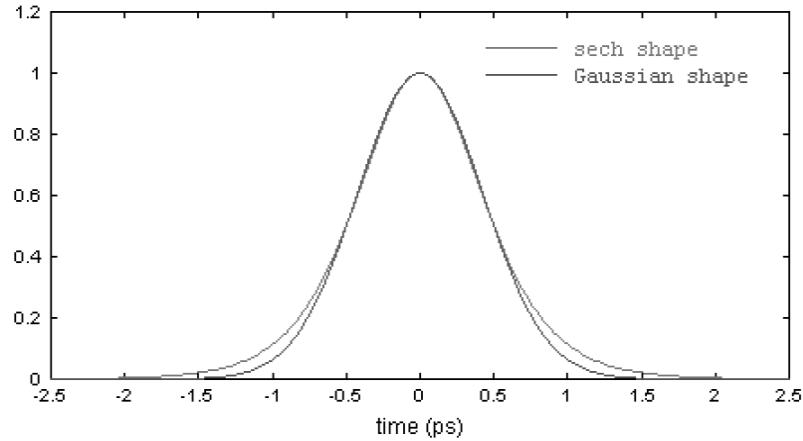
<b>FSR</b>	<b>50 GHz</b>	<b>100 GHz</b>
<b>F</b>	<b>100</b>	<b>200</b>
<b>BW<sub>sp</sub></b>	<b>500 MHz</b>	<b>500 MHz</b>
<b>BW<sub>dp</sub></b>	<b>322 MHz</b>	<b>322 MHz</b>
<b>R</b>	<b>0.969</b>	<b>0.984</b>

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά Συμβολόμετρων Fabry - Péroτ

#### 4.5 Υπολογισμός Συνάρτησης Μεταφοράς της Διάταξης

Οι παλμοί που προκύπτουν από το ERGO laser είναι της μορφής sech με παραμέτρους  $\tau = 1.078 \text{ ps}$  και ισχύ που καθορίζεται από την έξοδο του laser. Ωστόσο οι παλμοί αυτού του τύπου δεν έχουν μετασχηματισμό Fourier σε κλειστή μορφή και έτσι είναι αδύνατος ο ακριβής υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς της Πολυκυματικής Πηγής. Ο υπολογισμός που θα ακολουθήσει θα βασιστεί στην παραδοχή ότι οι παλμοί εισόδου της διάταξης είναι Gauss. Η παραδοχή αυτή είναι αποδεκτή αφού η μορφή των παλμών Gauss ελάχιστα διαφέρει από αυτή των sech που προκύπτουν από passively mode – locked lasers. Ως γνωστόν οι παλμοί Gauss έχουν την ίδια μορφή και στο πεδίο της συχνότητας επιτρέποντας και διευκολύνοντας την ανάλυση της πηγής και τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς. Για αυτή θα ισχύει:

$$T(f) = \tilde{U}_{ERGO}(f) * T_{PCF}(f) * T_{FP}(f) \quad (4.91)$$



Σχήμα 4.18: Σύγκριση Παλμών Gauss και Sech

Η συνάρτηση μεταφοράς του ERGO laser είναι:

$$\tilde{U}_{ERGO}(f) = U_0 \exp \left[ -\frac{4\pi^2 T_0^2 f^2}{2(1+jC)} \right] \quad (4.92)$$

όπου  $U_0 = P_{av} \frac{T_R}{T_0} = 400mW * (80ps/1.9ps) = 16.84W$  μετά τον EDFA ( $P_{out} (dBm) = 26dBm \rightarrow P(mW) \approx 400mW$ ) που βρίσκεται ενδιάμεσα της πηγής και της PCF και C η παράμετρος του chirp.

Για την PCF υπολογίζουμε τα μήκη  $L_D$  και  $L_{NL}$ :

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} = \frac{2\pi c T_0^2}{\lambda^2 |D|} = 2.36km, \quad L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{\gamma U_0} = 5.4m \quad (4.93)$$

και δεδομένου ότι τα μήκη των PCF που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 50 και 100 m ισχύει ότι:

$$L \ll L_D, \quad L > L_{NL} \quad (4.94)$$

οπότε μπορούμε να αγνοήσουμε την επίδραση της διασποράς στην εξίσωση Schrödinger και να συμπεριληφθεί μόνο ο όρος της μη – γραμμικότητας. Έτσι παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial K}{\partial z} = \frac{j}{L_{NL}} \exp(-az) |K|^2 K \quad (4.95)$$

όπου ο μετασχηματισμός  $A(z, \tau) = \sqrt{U_0} \exp(-az/2) K(z, \tau)$

Οι λύσεις της εξίσωσης αυτής είναι της μορφής:

$$K(z, T) = K(0, T) \exp(j\phi_{NL}(z, T)) \quad \text{με} \quad \phi_{NL}(z, T) = |K(0, T)|^2 \left( \frac{1 - \exp(-az)}{aL_{NL}} \right) \quad (4.96)$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι η περιβάλλουσα των παλμών παραμένει αναλλοίωτη με τη διαφορά ότι εισάγεται μια μη – γραμμική φάση που προκαλεί εξάπλωση του φάσματος. Η εξάπλωση αυτή λόγω της SPM είναι:

$$\delta\omega_{\max} = \frac{0.86\phi_{\max}}{T_0} = \frac{0.86L_{eff}}{T_0 L_{NL}} \approx \frac{0.86}{aT_0 L_{NL}} \quad (4.97)$$

και δίνει περίπου  $\delta f_{\max} \approx 6.43 \text{ THz}$ . Στην πραγματικότητα το φάσμα αυτό είναι αρκετά μεγαλύτερο αφού σημαντικό ρόλο εκτός από την SPM παίζουν κυρίως η FWM και η SRS. Ιδιαίτερα, για την ενεργοποίηση της FWM είναι ιδιαίτερα σημαντικό το γεγονός ότι η διασπορά διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα ( $D \approx 1.2 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ ) έτσι ώστε να υπάρχει μια σχετική συνοχή φάσης, ή τουλάχιστον μια μικρή απόκλιση στις διάφορες φασματικές συνιστώσες.

Το συμβολόμετρο Fabry – Péroτ που βρίσκεται στο τελευταίο τμήμα της διάταξης μπορεί να έχει διαφορετική συνάρτηση μεταφοράς ανάλογα με το αν ληφθεί μονή ή διπλή διέλευση από αυτό. Στην περίπτωση της διπλής διέλευσης, η οποία είναι και η πιο ενδιαφέρουσα, η συνάρτηση μεταφοράς θα είναι:

$$T_{FP}(f) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{2\sqrt{R}}{1-R} \sin\left(\frac{\pi f}{FSR}\right)\right)^2\right)^2} \quad (4.98)$$

με R και FSR που δίνονται στον πίνακα 4.4. Τελικά η διάταξη μας έχει σαν έξοδο αυτή του συμβολόμετρου FP το οποίο ωστόσο τροφοδοτείται με ένα ευρύτατο φάσμα παράγοντας ένα πολύ μεγάλο αριθμό καναλιών που είναι συντονισμένα στο πλέγμα της ITU.

#### **4.6 Αναφορές 4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**

- [1] Siegman, A. E., *Lasers*, University Science Books, 1986
- [2] Bahaa E. A. Saleh and Malvin Karl Teich, “*Fundamentals of Photonics*”  
John Wiley & Sons, NY, 1991
- [3] Peter W. Smith, “*Mode – Locking of Lasers*”, IEEE Proceedings, vol. 58,  
pp. 1342-1357, Sep. 1970
- [4] Ursula Keller, “*Recent developments in compact ultrafast lasers*”, Nature,  
vol. 424, pp. 831-838, 14 Aug. 2003
- [5] Herman A. Haus, “*Mode – Locking of Lasers*”, IEEE Journal on Selected  
Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 6, pp. 1173-1185, Nov.  
/Dec. 2000
- [6] Ursula Keller et al., “*Semiconductor Saturable Absorber Mirrors (SESAMs)  
for Femtosecond to Nanosecond Pulse Generation in Solid-State Lasers*”, IEEE  
Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 2, No. 3, pp.  
435-453, Sep. 1996
- [7] G. J. Spühler, “*Passively modelocked diode-pumped erbium-ytterbium glass  
laser using a semiconductor saturable absorber mirror*”, Electronics Letters,  
vol. 35, no. 7, pp. 567-568, Apr. 1999
- [8] G. P. Agrawal, “*Nonlinear Fiber Optics*”, 3rd Ed., Academic Press  
Inc., CA, 2001
- [9] Philip St. J. Russell, “*Photonic-Crystal Fibers*”, IEEE/OSA Journal of  
Lightwave Technology, Vol. 24, No. 12, pp. 4729-4749, Dec. 2006
- [10] P. A Andersen et al., “*Photonic Crystal Fibers used in a Multi-Wavelength  
Source and as Transmission Fiber in a WDM System*”, presented at  
Conference in Lasers and Electro – Optics (LEOS) 2004

- [11] S. K. Varshney et al., “*A Novel Design for Dispersion Compensating Photonic Crystal Fiber Raman Amplifier*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 17, No. 10, pp. 2062-2064, Oct. 2005
- [12] J. Lægsgaard et al., “*Photonic Crystal Fibers*”, Proceedings SBMO/IEEE MTT-S IMOC 2003
- [13] T. A. Birks, J. C. Knight, and P. S. J. Russell, “*Endlessly single mode photonic crystal fibre*”, Optics Letters, vol. 22, pp. 961-963, 1997
- [14] K. Kurokawa, K. Tajima, K. Tsujikawa, and K. Nakajima, “*Penalty-free dispersion-managed soliton transmission over a 100-km low-loss PCF*”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 1, pp. 32–37, Jan. 2006
- [15] Albert Ferrando, Enrique Silvestre, and Pedro Andrés, “*Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers*”, Optics Express, vol. 9, pp. 687-697, 2001
- [16] D. Kim and J. U. Kang, “*Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity*”, Optics Express, vol. 12, no. 19, pp. 4490–4495, Sep. 2004
- [17] F. Luan, J. C. Knight, P. St.J. Russell, S. Campbell, D. Xiao, D. T. Reid, B. J. Mangan, D. P. Williams, and P. J. Roberts, “*Femtosecond soliton pulse delivery at 800 nm wavelength in hollow-core photonic bandgap fibers*”, Optics Express, vol. 12, no. 5, pp. 835–840, Mar. 2004
- [18] W. J. Wadsworth, R. M. Percival, G. Bouwmans, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, “*High power air-clad photonic crystal fiber laser*”, Optics Express, vol. 11, no. 1, pp. 48–53, Jan. 2003
- [19] I. Hartl et al., “*Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber*”, Optics Letters, vol. 26, no. 9, pp. 608–610, May 2001

- [20] R. Holzwarth et al., “*White-light frequency comb generation with a diode-pumped Cr:LiSAF laser*”, Optics Letters, vol. 26, no. 17, pp. 1376–1378, Sept. 2001
- [21] T. Yamanoto et al., “*Supercontinuum generation at 1.55  $\mu\text{m}$  in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber*”, Optics Express, vol. 11, no. 13, pp. 1537–1540, June 2003
- [22] P. Bakopoulos et al., “*Multi-Wavelength Laser Source for Dense Wavelength Division Multiplexing Networks*”, presented at the Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2007, Anaheim, CA
- [23] R. Holzwarth et al., “*Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy*”, Phys. Rev. Letters, vol. 85, no. 11, pp. 2264–2267, Sept. 2000
- [24] Kim P. Hansen & René E. Kristiansen, “*Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fibers*” Crystal Fibre®, Application Note
- [25] A. Husakou, V.P. Kalosha, and J. Herrmann, “*Nonlinear Phenomena with Ultra-Broadband Optical Radiation in Photonic Crystal Fibers and Hollow Waveguides*”
- [26] K. Yiannopoulos et al., “*Pulse Repetition Frequency Multiplication with Spectral Selection in Fabry – Perot Filters*”, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 40, No. 2, pp. 157-165, Feb. 2004
- [27] C. Bintjas et al., “*Clock recovery circuit for optical packets*”, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 14, No. 9, pp. 1363-1365, Sep. 2002
- [28] K. Yiannopoulos et al., “*Repetition Rate Upgrade for Optical Sources*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, No. 6, pp. 861-863, Jun. 2003





# **Κεφάλαιο 5**

## **Πειραματικά Αποτελέσματα Πολυκυματικής Πηγής DWDM**

## 5.1 Εισαγωγή

Σε προηγούμενα κεφάλαια αναδείξαμε τη χρησιμότητα και τη σημασία που έχει μια Πολυκυματική Πηγή για Δίκτυα Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος με την ικανότητα να παρέχει ταυτόχρονα ένα μεγάλο αριθμό μηκών κύματος από μια αρχική πηγή laser. Επιπλέον, δόθηκε μια θεωρητική προσέγγιση της λειτουργίας της πολυκυματικής πηγής. Ωστόσο, αυτό δεν θα είχε αξία αν για την εν λόγω διάταξη δεν ήταν δυνατόν να επιβεβαιωθεί η λειτουργία της και πειραματικά.

Η τοπολογία του πειράματος που στήθηκε εκτός από την πειραματική διάταξη, περιλαμβάνει και άλλα τμήματα τα οποία είτε χρησιμεύουν στη καλύτερη διεξαγωγή του πειράματος είτε στην λήψη μετρήσεων.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές οπτικές ίνες με μήκη 50 και 100 m όπως επίσης και δυο διαφορετικά Συμβολόμετρα Fabry – Péroτ με FSR 50 και 100 GHz αντίστοιχα. Διάφοροι τύποι μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν όπως μετρήσεις:

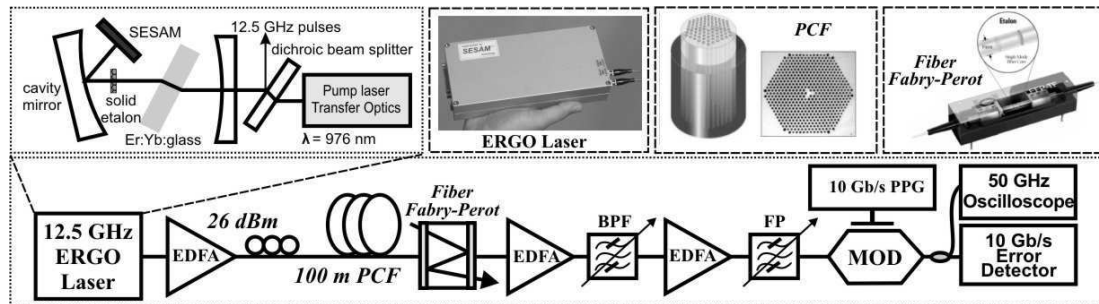
- A.** Φάσματος εισόδου, Supercontinuum και του φάσματος εξόδου.
- B.** Μετρήσεις Σταθερότητας των καναλιών.
- C.** Διαγράμματα Ματιού (Eye Diagrams).
- D.** Μετρήσεις Bit Error Rate (BER).

Για να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, έγιναν παράλληλα και κάποιες προσομοιώσεις με τη βοήθεια του λογισμικού **VPI** κυρίως σε ότι αφορά τη δημιουργία του Supercontinuum θεωρώντας δεδομένη την είσοδο που προκύπτει από το laser.

Τα πειραματικά αποτελέσματα αξιολογούνται συγκριτικά με τις προσομοιώσεις, εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα αλλά και τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα και βοηθούν στην συνολική αξιολόγηση της διάταξης.

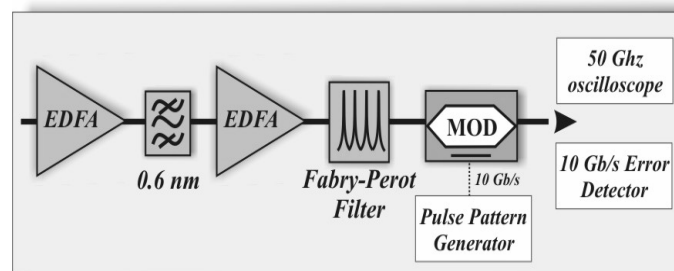
## 5.2 Αναλυτική Περιγραφή της Πειραματικής Διαδικασίας

Η πειραματική διάταξη εκτός από τα βασικά στοιχεία που περιλαμβάνει και τα οποία αναλύθηκαν εκτενώς σε προηγούμενα κεφάλαια, περιλαμβάνει πολλές άλλα στοιχεία που βοηθούν στην καλή λειτουργία της διάταξης αλλά και στην λήψη των μετρήσεων.



Σχήμα 5.1: Πειραματική Διάταξη

Εκτός από τα παραπάνω στοιχεία μετά τη διέλευση του οπτικού σήματος από το FP, βρίσκεται ένας απομονωτής (isolator) που οδηγεί το σήμα σε ένα **Κάτοπτρο Περιστροφής Faraday (Faraday Rotate Mirror)**. Στο κάτοπτρο αυτό το προσπίπτον πεδίο ανακλάται πλήρως προς τα πίσω με τη διαφορά ότι συμβαίνει μια στροφή στην πόλωση κατά  $90^\circ$ . Το ανακλώμενο πεδίο διέρχεται και πάλι από το FP επιτυγχάνοντας καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά το φασματικό διαχωρισμό των καναλιών και απομονώνεται στην έξοδο με τη βοήθεια ενός **Διαχωριστή Δέσμης Πόλωσης (Polarization Beam Splitter)**. Ακολούθως, το οπτικό σήμα διέρχεται μέσα από έναν EDFA για ενίσχυση και ακολουθεί το στάδιο των μετρήσεων.



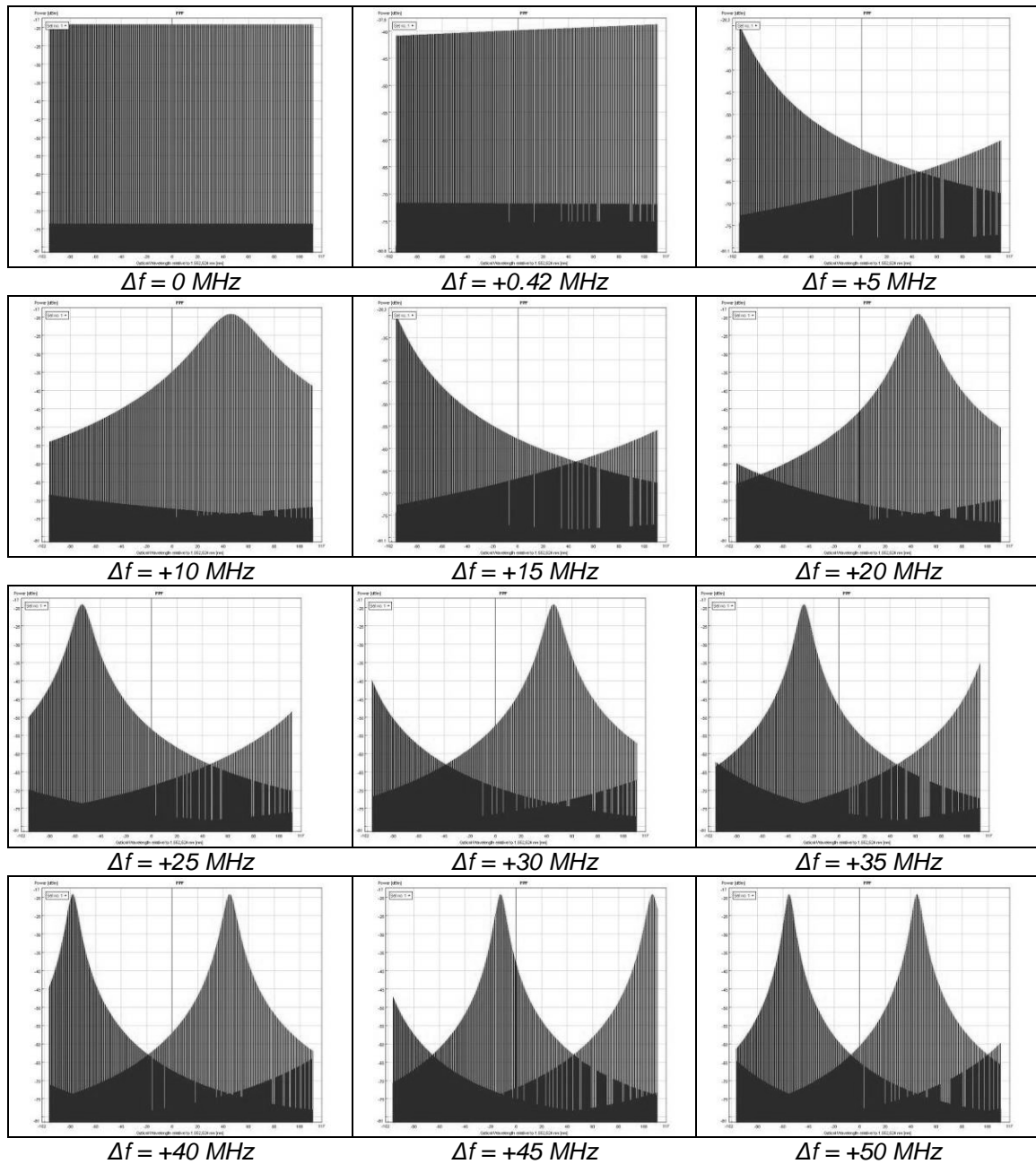
Σχήμα 5.2: Διάταξη για τη λήψη μετρήσεων

Για την απομόνωση κάθε CW καναλιού και τη μέτρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του χρησιμοποιήθηκε ένα ζωνοπερατό φίλτρο με εύρος  $0.6 \text{ nm}$  ( $\sim 75 \text{ GHz}$  στα  $1550 \text{ nm}$ ) και στη συνέχεια ένα συμβολόμετρο FP με  $FWHM = 290 \text{ MHz}$ . Κάθε CW κανάλι του οποίου το φάσμα απομονώθηκε, διαμορφώθηκε εξωτερικά από ένα διαμορφωτή του τύπου  $Ti:LiNbO_3$  στα  $10 \text{ Gbps}$  με ακολουθίες του τύπου  $PRBS 2^{31} - 1$ . Από τα διαμορφωμένα κανάλια που προέκυψαν, ελήφθησαν μετρήσεις  $BER$  και  $Eye Diagrams$  για την αξιολόγηση της ποιότητας των καναλιών. Επιπλέον, εκτός από τις μετρήσεις των καναλιών της Πολυκυματικής Πηγής, ελήφθησαν οι ίδιες μετρήσεις με παλμούς που προέκυψαν από ένα εμπορικά διαθέσιμο DFB laser για σύγκριση. *Ελεγκτές Πόλωσης (Polarization Controllers)* χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορα σημεία της πειραματικής διάταξης για διόρθωση της πόλωσης μιας και οι οπτικές ίνες που χρησιμοποιήθηκαν δεν είχαν ιδιότητες διατήρησης πόλωσης.

### 5.3 Προσομοίωση Πολυκυματικής Πηγής

Πριν την εκκίνηση της πειραματικής διαδικασίας εκτελέστηκε μια σειρά από προσομοιώσεις με σκοπό να δοθεί μια πρώτη εκτίμηση των αναμενόμενων αποτελεσμάτων. Η προσομοίωση αυτή είχε ως κύριο σκοπό την εκτίμηση του Supercontinuum με είσοδο τους παλμούς που προκύπτουν μετά τον EDFA. Αρχικά εξετάστηκε το φαινόμενο του αποσυντονισμού  $\Delta f$  των φίλτρων Fabry – Péroτ με την αύξηση του FSR. Όταν το φίλτρο είναι ακριβώς συντονισμένο στη συχνότητα του laser, οι επιθυμητές αρμονικές συμπίπτουν με τα μέγιστα του Fabry – Péroτ και επιτυγχάνεται μέγιστη καταπίεση της τάξης των 50 dB. Ο αποσυντονισμός των αρμονικών με το laser οδηγεί σε μια ανεπιθύμητη διαμόρφωση πλάτους των αρμονικών στην έξοδο. Η διαφορά αυτή στην φάση  $\Delta f$  δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται ανάλογα με την τάξη της αρμονικής. Για παράδειγμα αν η  $i$ -οστή αρμονική είναι αποσυντονισμένη κατά  $k \cdot \Delta f$  η  $i+1$  θα είναι κατά  $(k + 1) \cdot \Delta f$ . Τα

αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα για  $\Delta f$  που μεταβάλλεται από 0 ως 50 MHz και FSR=50 GHz:

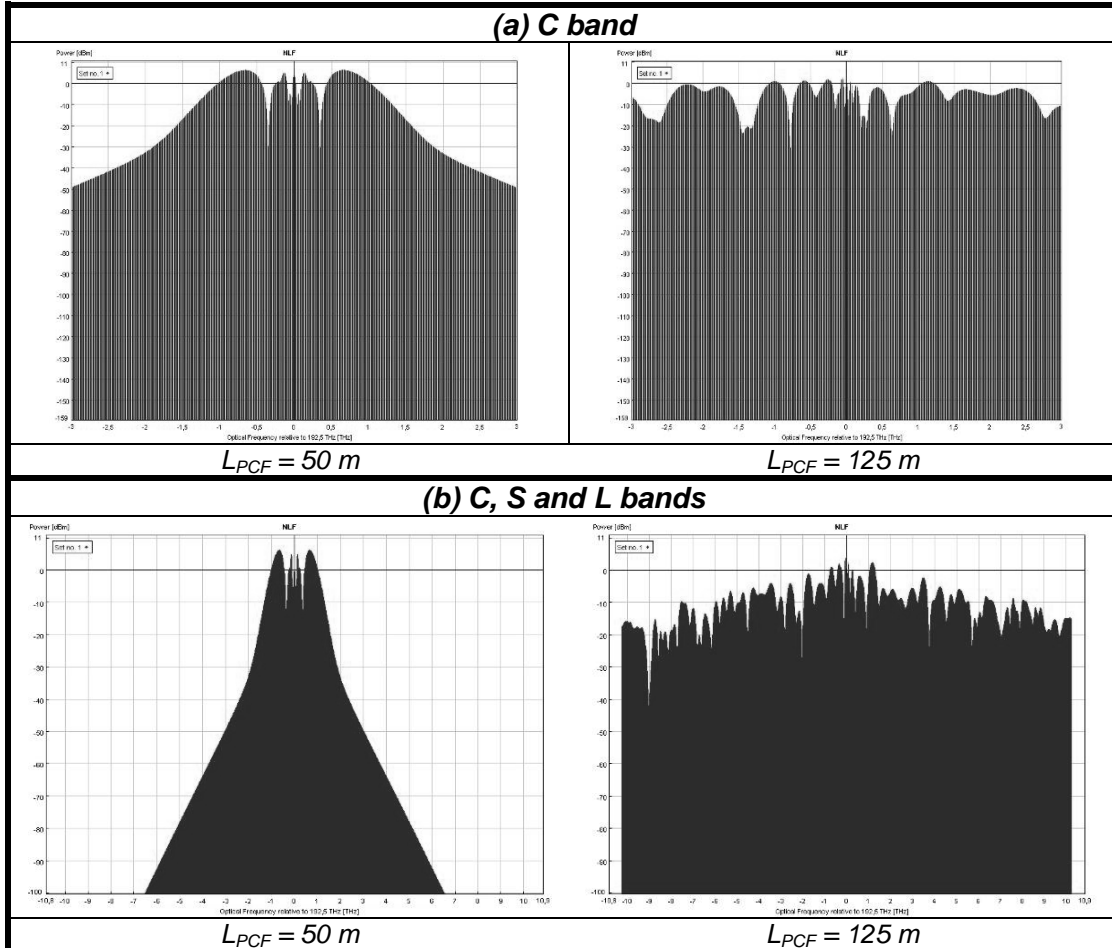


Σχήμα 5.3: Αποσυντονισμός του FP με το ρυθμό επανάληψης του laser για διάφορες τιμές του  $\Delta f$

Το μέγιστο αποδεκτό  $\Delta f$  που προκύπτει είναι της τάξης των 13 MHz.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση με σκοπό να εξεταστεί η επίδραση του μήκους της οπτικής ίνας PCF στην παραγωγή του Supercontinuum. Συγκεκριμένα, για ισχύ κορυφής 13 W, που είναι πολύ κοντά στην πειραματική τιμή, και είσοδο παλμό χρονικού εύρους

1.9 ps και φασματικού εύρους 3 nm, εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις για μήκος της PCF  $L = 50\text{ m}$  και  $125\text{ m}$ . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

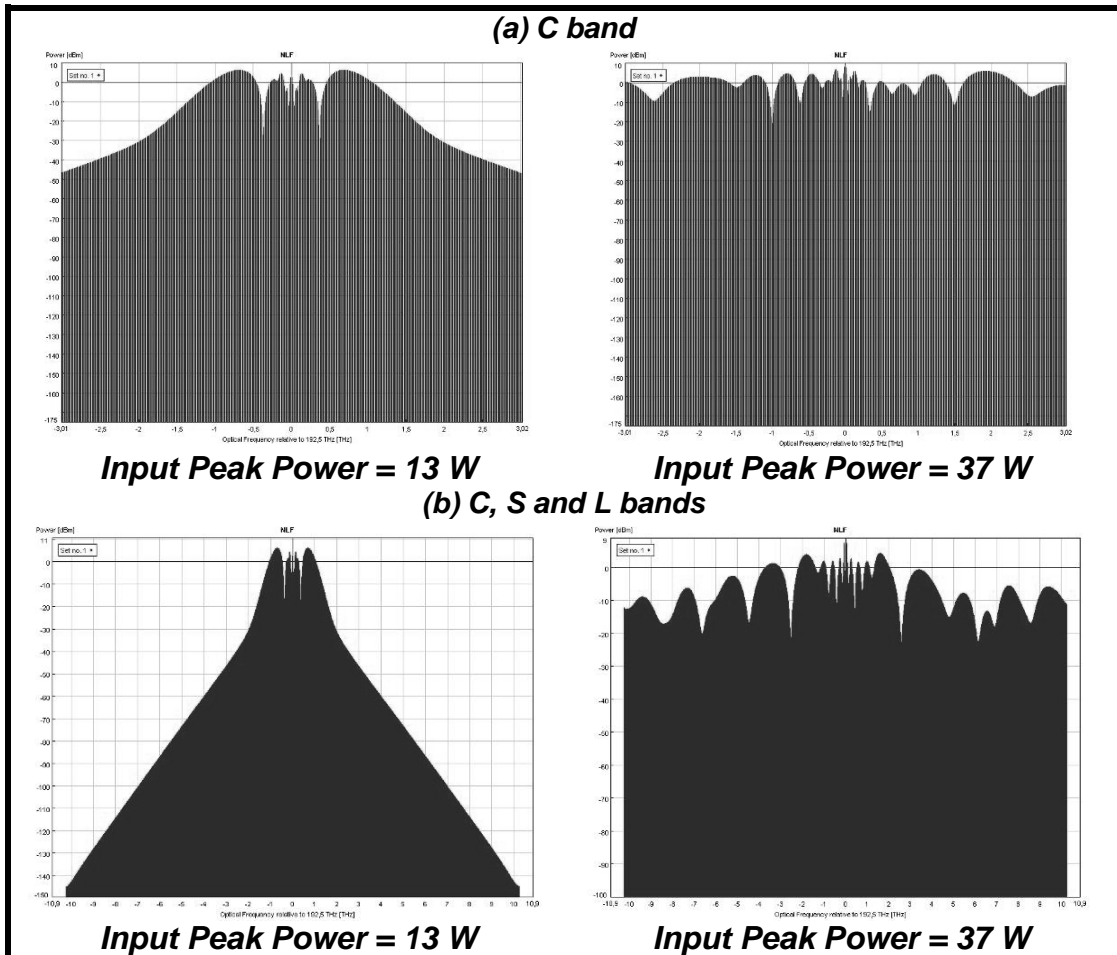


Σχήμα 5.4: Supercontinuum που προκύπτει για  $L = 50\text{ m}$  και  $125\text{ m}$  σε εύρος ίσο με την C μάντα και τις C, S και L μάντες της ITU

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι το Supercontinuum που προκύπτει από την δεύτερη περίπτωση είναι πολύ καλύτερο και καταλαμβάνει όλο το εύρος μετάδοσης των 1550 nm. Έτσι, ενώ μια οπτική ίνα PCF μήκους 50 m είναι αρκετή για την κατασκευή μιας πολυκυματικής πηγής με κανάλια που καλύπτουν την C μάντα της ITU κάτι τέτοιο δεν ισχύει και για την περίπτωση που επιθυμούμε να καλύψουμε όλο το φάσμα μετάδοσης των 1550 nm.

Ακολούθως, με τις ίδιες παραμέτρους για τους παλμούς εισόδου και μήκος της PCF ίσο με 50 m, πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση για να εξεταστεί η επίδραση της ισχύος κορυφής στο Supercontinuum.

Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές προσομοιώσεις για ισχύεις 13 W και 37 W. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.5: Supercontinuum που προκύπτει για  $L = 50 \text{ m}$  και Peak Power 13 και 37W σε εύρος ίσο με την C μπάντα και τις C, S και L μπάντες της ITU

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ανάλογα με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης. Κρατώντας σταθερό το μήκος της ίνας, είναι απαραίτητη η αύξηση της ισχύος κορυφής κατά 20 W για να επιτευχθεί λειτουργία σε όλο το εύρος μετάδοσης των 1550 nm.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι για την αναβάθμιση ενός συστήματος στις ζώνες S, C και L της ITU, είναι απαραίτητη η μεταβολή μιας από τις δυο παραμέτρους, είτε δηλαδή του μήκους της ίνας, είτε της ισχύος κορυφής. Ωστόσο, ως καλύτερη λύση είναι προφανές ότι προτείνεται η αύξηση του μήκους της οπτικής ίνας

σε μήκος της τάξης των 125 nm, αφού μια ισχύς κορυφής της τάξης των 37 W δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την προσθήκη ενός και μόνο EDFA. Η λειτουργία της πηγής με την προσθήκη ενός Fabry – Péroτ στην έξοδο αναμένεται αρκετά καλή με βάση τα παραπάνω.

#### **5.4 Πειραματικά Αποτελέσματα Πολυκυματικής Πηγής**

Οι πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν είναι τεσσάρων τύπων:

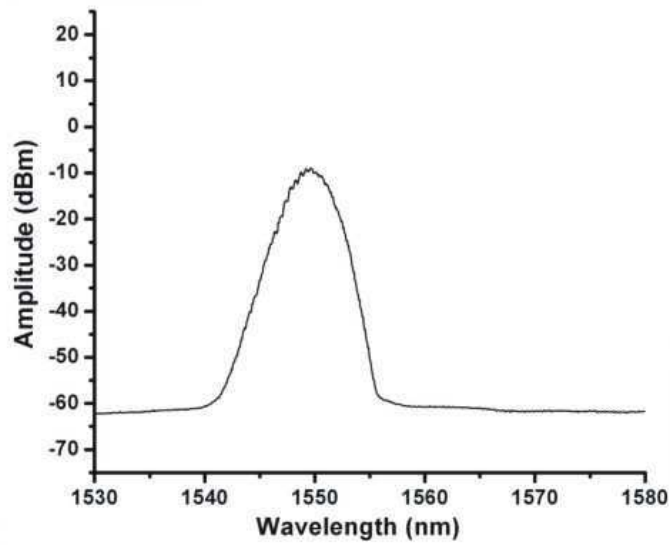
- A. Οπτικά και RF Φάσματα Εισόδου, Supercontinuum και Εξόδου.
- B. Μετρήσεις Σταθερότητας των Φασματικών Καναλιών.
- C. Eye Diagrams.
- D. Μετρήσεις BER.

Κάθε τύπος μετρήσεων προσφέρει διαφορετικό είδος πληροφορίας αποτελεσμάτων που συνολικά μπορούν να παράγουν μια γενική εικόνα για την εύρωστη λειτουργία της διάταξης αλλά και για τα τεχνικά χαρακτηριστικά της.

##### **5.4.1 Φάσματα Εισόδου, Supercontinuum και Εξόδου**

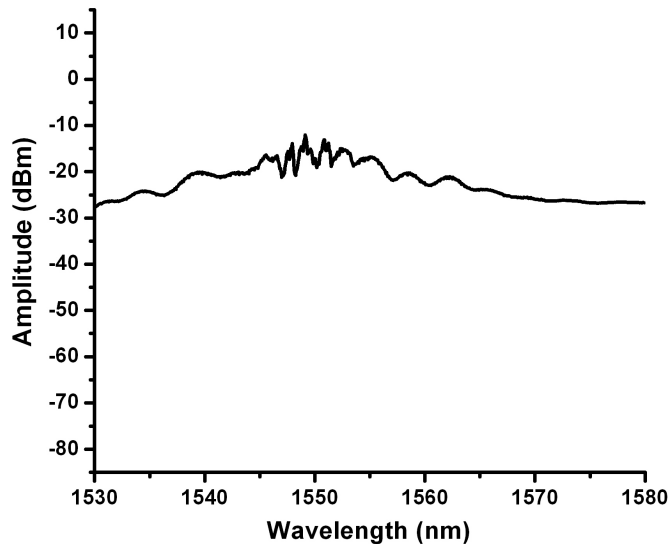
Τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν αφορούν τα φάσματα εισόδου, Supercontinuum και εξόδου της διάταξης. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός **Οπτικού Αναλυτή Φάσματος (Optical Spectrum Analyzer)**. Αρχικά, παρατηρήθηκε το φάσμα εισόδου που προέκυψε από το ERGO laser. Το φάσμα αυτό έχει εύρος ημίσειας ισχύος περίπου 3 nm και μετρήθηκε απευθείας μετά την αρχική πηγή. Τα αποτελέσματα δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



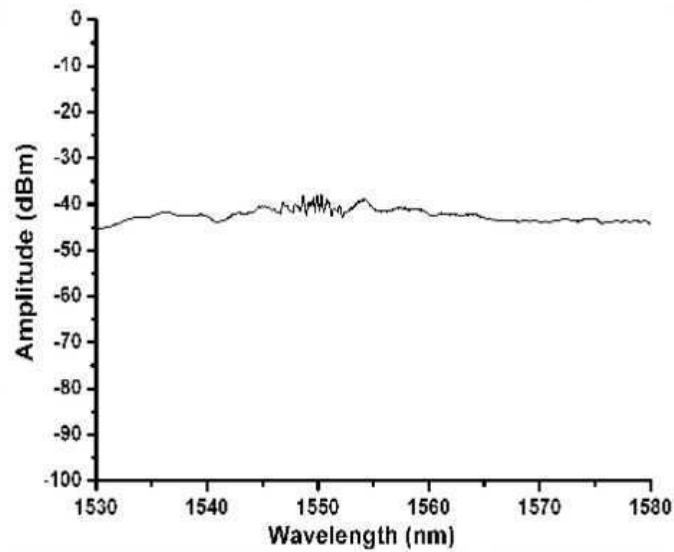


Διάγραμμα 5.1: Φάσμα Εισόδου της πηγής ERGO laser

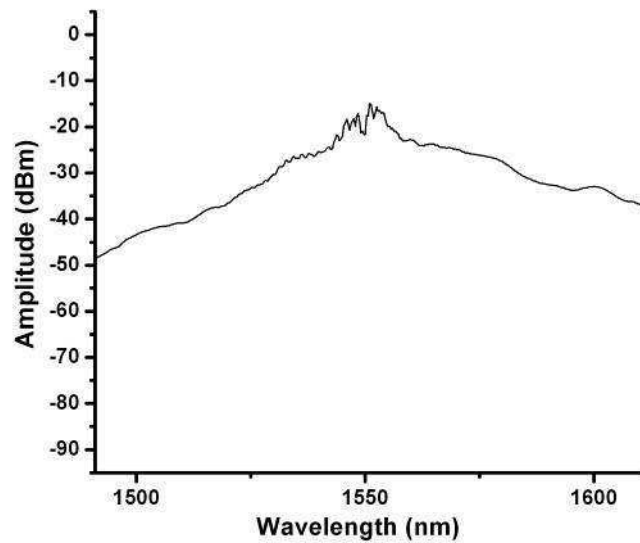
Επιπλέον, εκτός από την είσοδο μετρήθηκε το Supercontinuum σε εύρος που καλύπτει την C και τις S, C, και L ζώνες της ITU. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Διάγραμμα 5.2: Supercontinuum σε εύρος που καλύπτει την C μάλιστα της ITU ( $L_{PCF} = 50 \text{ m}$ )



Διάγραμμα 5.3: Supercontinuum σε εύρος που καλύπτει την C μπάντα της ITU ( $L_{PCF} = 100 \text{ m}$ )

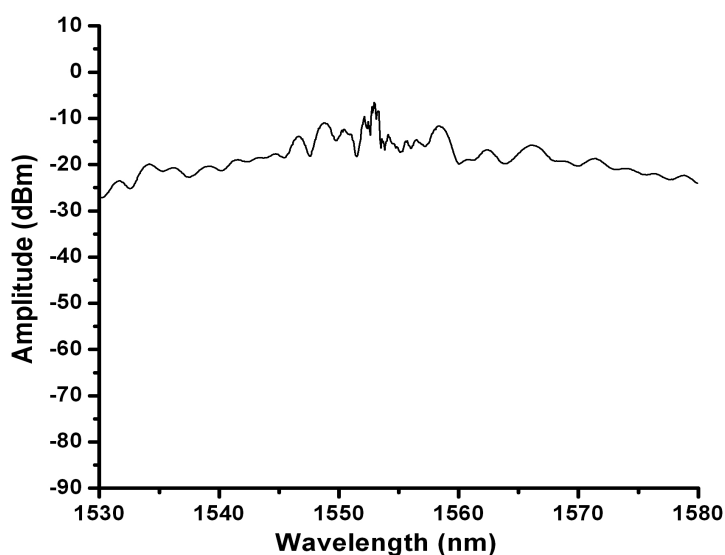


Διάγραμμα 5.4: Supercontinuum σε εύρος που καλύπτει τις S, C και L μπάντες της ITU ( $L_{PCF} = 50 \text{ m}$ )

Η ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε ήταν της τάξης των 0.1 nm και η οπτική ίνα είχε μήκη 50 και 100 m. Το Supercontinuum που προέκυψε φαίνεται να είναι σύμφωνο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

αφού η συγκεκριμένη διάταξη έχει άριστη επίδοση σε όλη την C μπάντα αλλά χρειάζεται μια οπτική ίνα μήκους 100 m για να επιτευχθεί καλή λειτουργία σε όλο το εύρος των 1550 nm.

Για την αξιολόγηση του φάσματος που προέκυψε από την PCF λήφθηκαν μετρήσεις με αρχική πηγή ένα εμπορικά διαθέσιμο laser τύπου DFB με εύρος περίπου 9 ps και ρυθμό επανάληψης 10 GHz. Επιπλέον, για καλύτερη συμπίεση των παλμών, πριν την οπτική ίνα χρησιμοποιήθηκε μια τοπολογία αποτελούμενη από μια DSF ακολουθούμενη από μια SMF. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

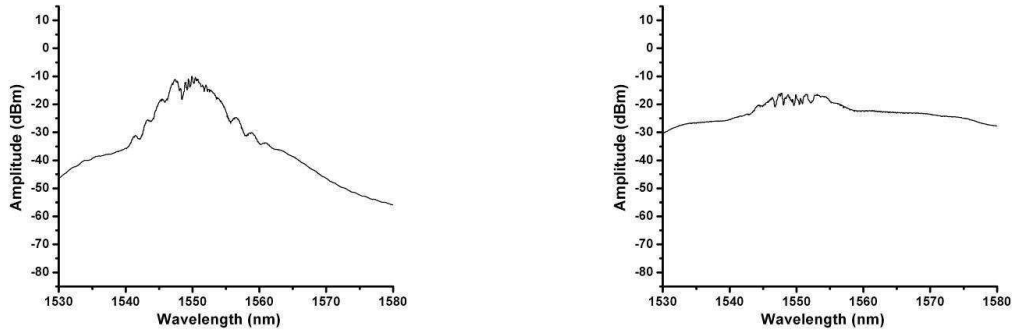


Διάγραμμα 5.5: Supercontinuum προερχόμενο από μια DFB πηγή laser.

Από τα Διαγράμματα 5.2 και 5.3 μπορούμε να δούμε ότι το Supercontinuum που προκύπτει από το ERGO laser είναι σχετικά καλύτερο και περισσότερο επίπεδο από το εμπορικά διαθέσιμο DFB. Η επίδοση του ERGO laser δεν διαφέρει σε τίποτα από αυτή ενός εμπορικού laser τουλάχιστον σε ότι αφορά τους παλμούς εισόδου στην PCF για τη δημιουργία Supercontinuum.

Στο επόμενο στάδιο εξετάστηκε η εξάρτηση του Supercontinuum από την Πόλωση. Η οπτική ίνα PCF δεν έχει ιδιότητες διατήρησης της πόλωσης αν και αυτό είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια Polarization Maintaining PCFs. Για το λόγο αυτό, μεταβάλλοντας την

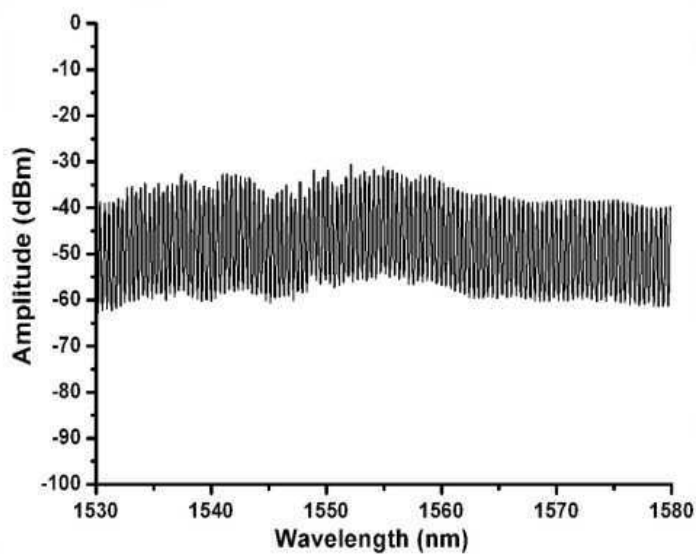
Πόλωση με τη βοήθεια Ελεγκτών Πόλωσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για την μέγιστη και την ελάχιστη εξάπλωση του φάσματος οι οποίες φαίνονται παρακάτω:



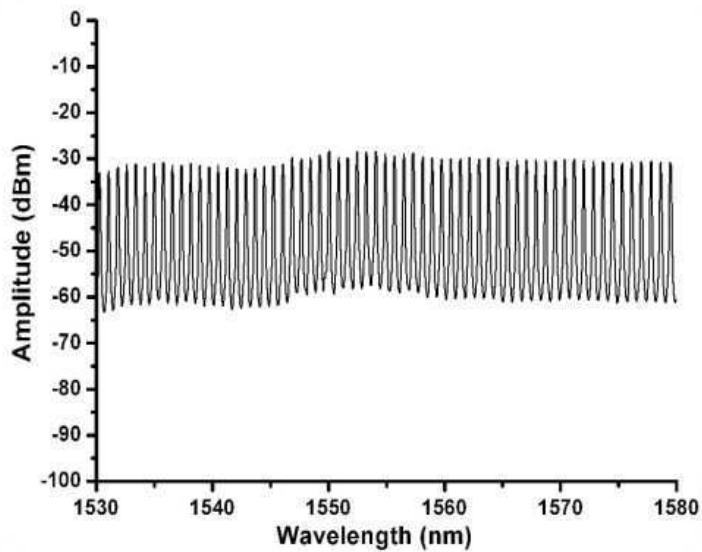
**(a)** **(b)**  
 Διάγραμμα 5.6: Εξάρτηση Εξάπλωσης Supercontinuum  
 με την πόλωση (a)ελάχιστη (b)μέγιστη

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων βλέπουμε πως υπάρχει μια ισχυρή εξάρτηση από την Πόλωση.

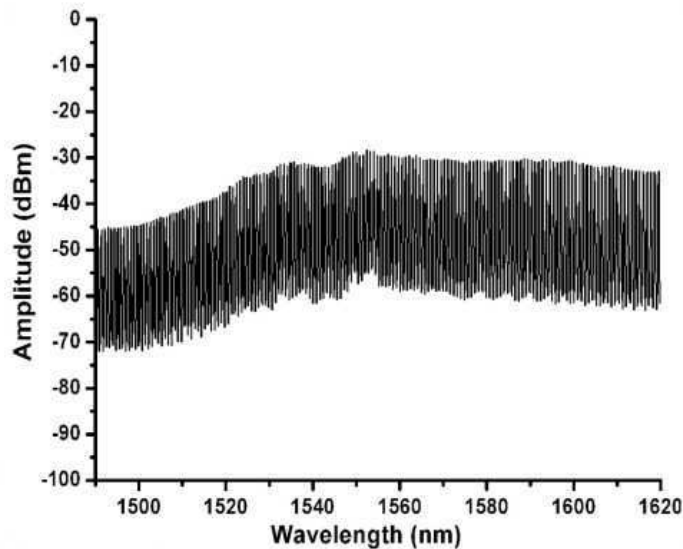
Στη συνέχεια, λήφθηκαν μετρήσεις του φάσματος εξόδου και για τα δύο διαφορετικά Fabry – Pérot των 50 και 100 GHz. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στα διαγράμματα 5.7 – 5.9:



Διάγραμμα 5.7: Φάσμα Εξόδου της διάταξης σε όλη την C μπάντα ( $FSR = 50 \text{ GHz}$ )



Διάγραμμα 5.8: Φάσμα Εξόδου της διάταξης σε όλη την C μπάντα ( $FSR = 100\text{ GHz}$ )

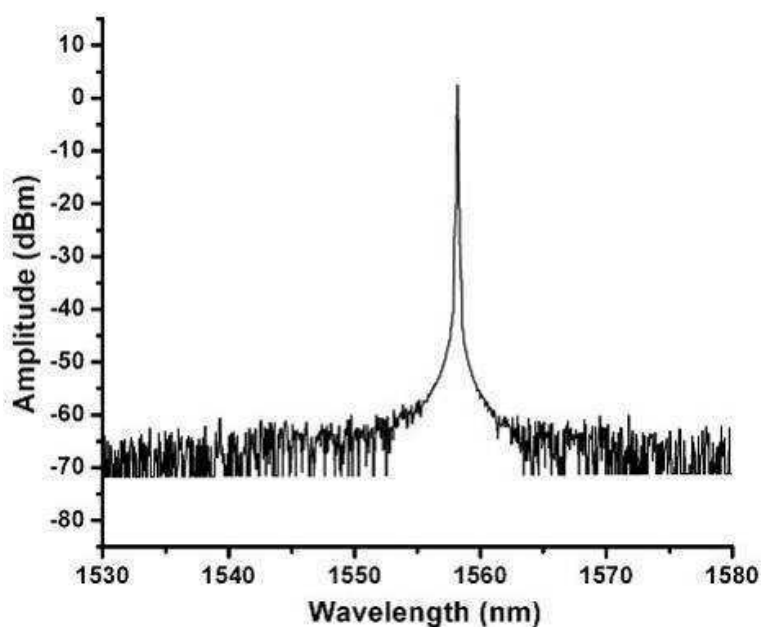


Διάγραμμα 5.9: Φάσμα Εξόδου της διάταξης σε όλη τη ζώνη μετάδοσης των 1550 nm ( $FSR = 100\text{ GHz}$ )

Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν double passing από το συμβολόμετρο FP. Η διακύμανση της ισχύος που παρατηρήθηκε μεταξύ των καναλιών δεν υπερβαίνει τα **8 dB** για  $FSR = 50\text{ GHz}$  και τα **4 dB** για  $FSR = 100\text{ GHz}$  σε όλη την C μπάντα. Οι τιμές αυτές είναι κοντά στις τιμές των 2 dB που δίνονται στις συστάσεις **G.957**, **G.698.1** και

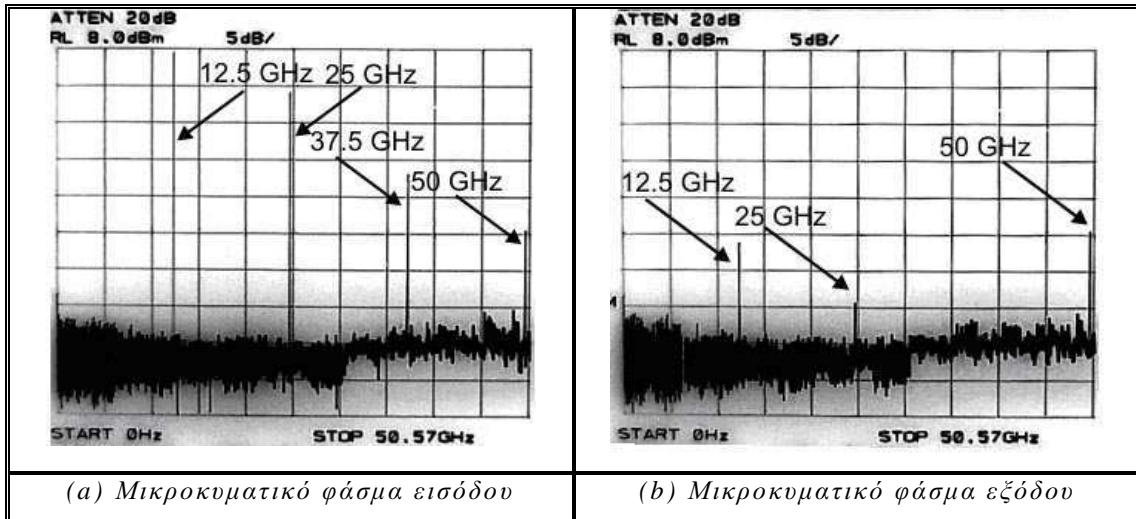
**G.959.1** της ITU για DWDM δίκτυα. Επιπλέον, για  $FSR = 100$  GHz η διακύμανση είναι της τάξης των 17 dB και για τις τρεις ζώνες μετάδοσης S, C και L. Η Καταπίεση των Πλευρικών Αρμονικών (Side Mode Suppression Ratio) είναι περίπου της τάξης των 30 dB κατά μέσο όρο όση δηλαδή προβλέπουν και οι οδηγίες **G.957**, **G.698.1** και **G.959.1** της ITU.

Για να εξεταστεί πιο διεξοδικά η επίδοση των DWDM καναλιών με τη βοήθεια ενός ζωνοπερατού φίλτρου απομονώθηκε ένα κανάλι στα 1558.17 nm του οποίου το φάσμα φαίνεται στο διάγραμμα 5.10:

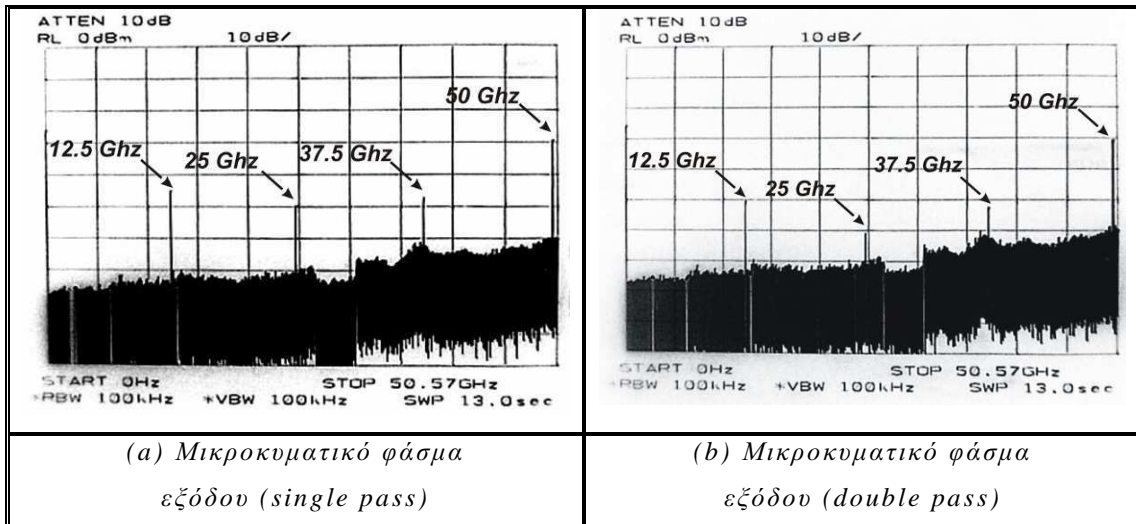


*Διάγραμμα 5.10: Απομόνωση καναλιού της πολυκυματικής πηγής στα 1558,17 nm*

Από τα παραπάνω φάσματα μπορούμε να έχουμε μια πρώτη εκτίμηση της επίδοσης της πολυκυματικής πηγής. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η λειτουργία της πηγής μετρήθηκαν παράλληλα και τα μικροκυματικά φάσματα των αρμονικών στην είσοδο και την έξοδο της διάταξης. Τα αποτελέσματα των RF μετρήσεων φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα 5.11 και 5.12:



Διάγραμμα 5.11: Μικροκυματικά φάσματα εισόδου και εξόδου ( $FSR = 50 \text{ GHz}$ )



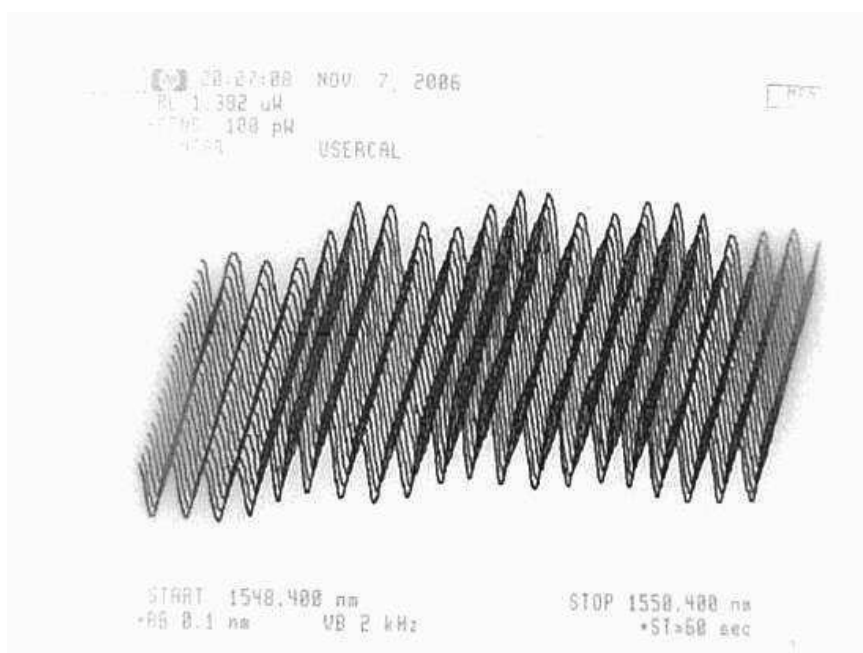
Διάγραμμα 5.12: Μικροκυματικά φάσματα εξόδου ( $FSR = 50 \text{ GHz}$ )

Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε πως η καταπίεση των αρμονικών είναι ικανοποιητική και για την πρώτη περίπτωση μετρήθηκε στις παρακάτω τιμές:

- A) 12.5 GHz: 26 dB
- B) 25 GHz: 27 dB
- C) 37.5 GHz: >20 dB

### 5.4.2 Μετρήσεις Σταθερότητας

Για την πειραματική επιβεβαίωση της σταθερότητας της λειτουργίας της Πολυκυματικής Πηγής εκτελέστηκε μια σειρά μετρήσεων με την βοήθεια ενός OSA που αφορούν την ικανότητα του φάσματος της πηγής να παραμένει ανεπηρέαστο από τις διάφορες μεταβολές στο χρόνο. Η σταθερότητα του φάσματος εισόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

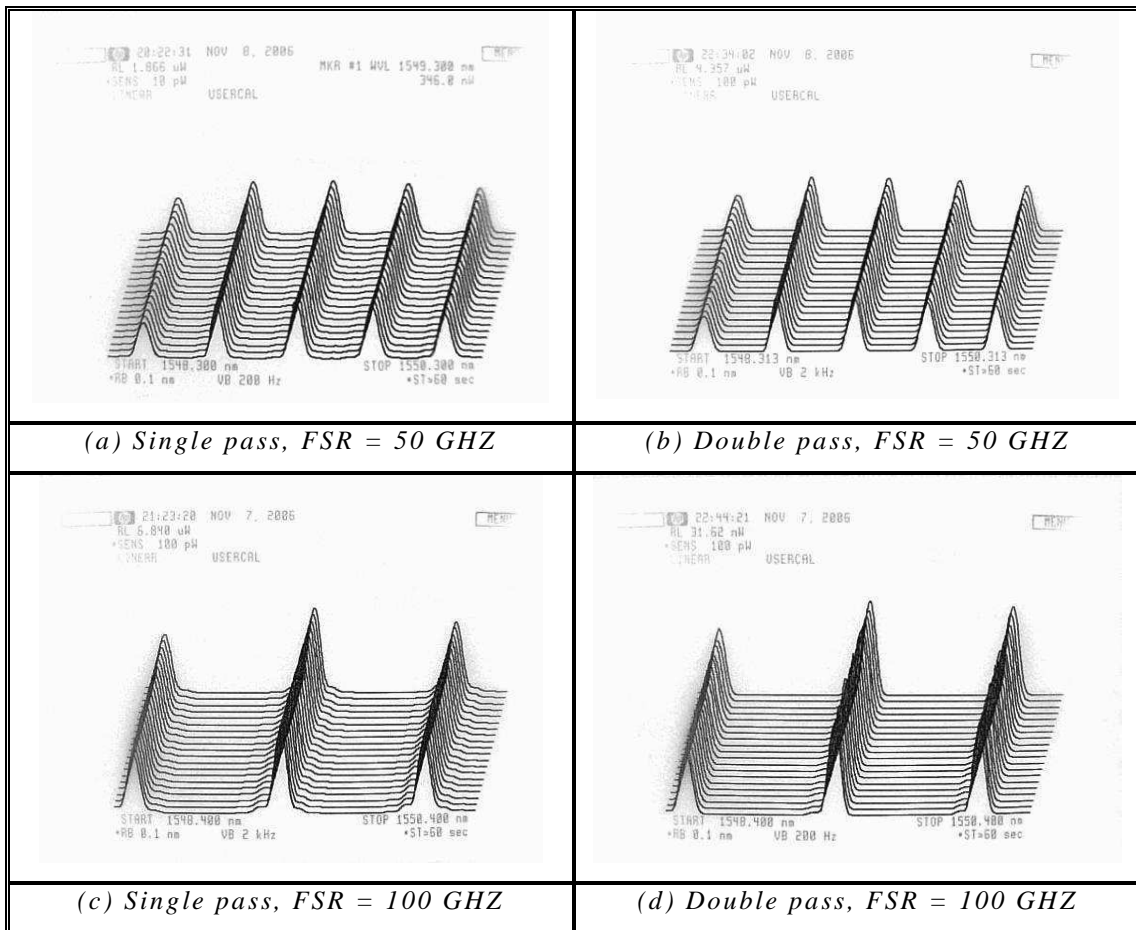


Σχήμα 5.6: Μεταβλητότητα του φάσματος εισόδου της Πολυκυματικής Πηγής

Ο χρόνος δειγματοληψίας ήταν 1 min και η ανάλυση του φάσματος 0.1 nm. Οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα της Πηγής στο χρόνο είναι πολλοί όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία αλλά και οι υπόλοιπες παράμετροι του περιβάλλοντος. Οι μετρήσεις αυτές είναι εξαιρετικά σημαντικές για να μπορεί μια τέτοια διάταξη να κατασκευαστεί ώστε να διατεθεί εμπορικά σε χαμηλό κόστος και χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις ελέγχου των παραμέτρων αυτών. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η φασματική απόκλιση των καναλιών που προκύπτουν μετά από τον διαχωρισμό τους με τη συχνότητα του αρχικού laser και πρέπει να παραμένει περιορισμένη σε μια μέγιστη τιμή. Στα παρακάτω



σχήματα φαίνεται η σταθερότητα της πηγής για συνδεσμολογίες single και double pass και FSR 50 και 100 GHz:



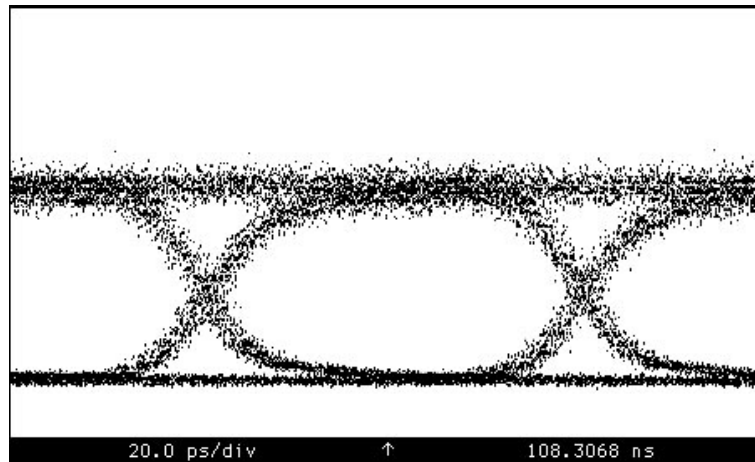
Σχήμα 5.7: Σταθερότητα του φάσματος εξόδου για όλες τις πιθανές εναλλακτικές

Από το παραπάνω σχήμα μπορούμε να δούμε ότι πρακτικά τα φασματικά κανάλια παραμένουν σταθερά και ανεπηρέαστα στο χρόνο.

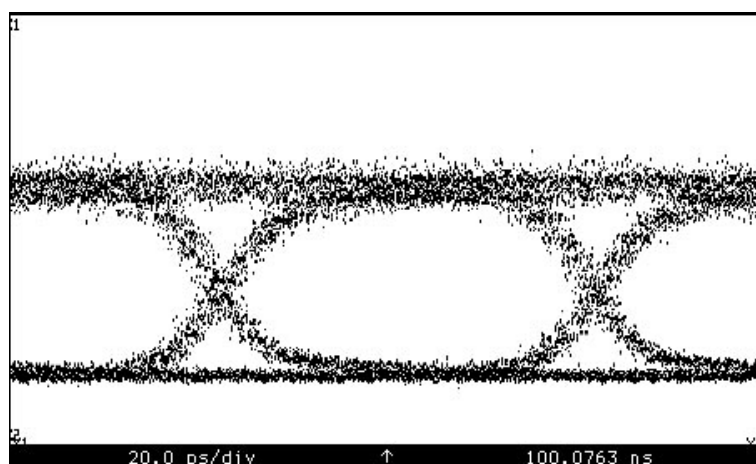
### 5.4.3 Διαγράμματα Μαιού (Eye Diagrams)

Ένας από τους σημαντικότερους τύπους μετρήσεων στην οπτική τεχνολογία είναι τα λεγόμενα Διαγράμματα Μαιού (Eye Diagrams). Τα διαγράμματα αυτά υπερθέτουν σε ένα διάγραμμα όλες τους πιθανούς συνδυασμούς ακολουθιών των τριών bit. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα σχήμα που μοιάζει με μάτι και το πόσο «ανοιχτό» είναι αυτό, καθορίζει και την ποιότητα του αποτελέσματος. Στη δική

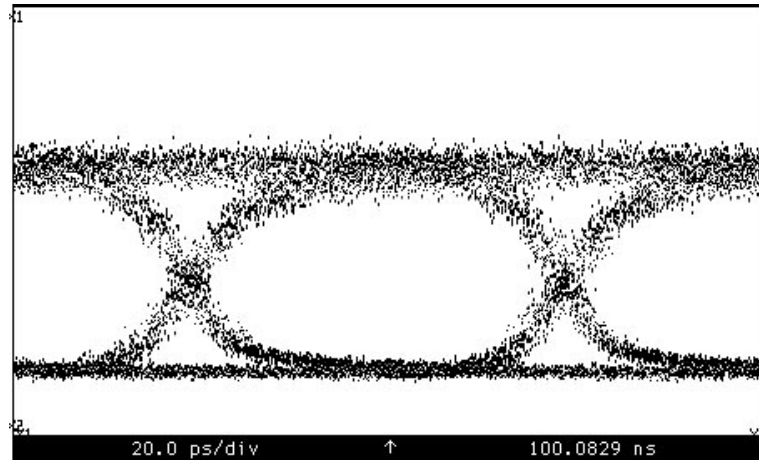
μας περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένας OSA για τις μετρήσεις των double pass τοπολογιών με FSR 50 και 100 GHz. Για το σκοπό αυτό συγκεκριμένα κανάλια της C μπάντας της ITU επιλέχθηκαν και στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στα 10 Gbps. Στα επόμενα διαγράμματα 5.13 – 5.28 φαίνονται τα eye diagrams των καναλιών αυτών και γίνεται μια σύγκριση με αυτά που έχουν προκύψει με αρχική πηγή το DFB laser που προαναφέρθηκε:



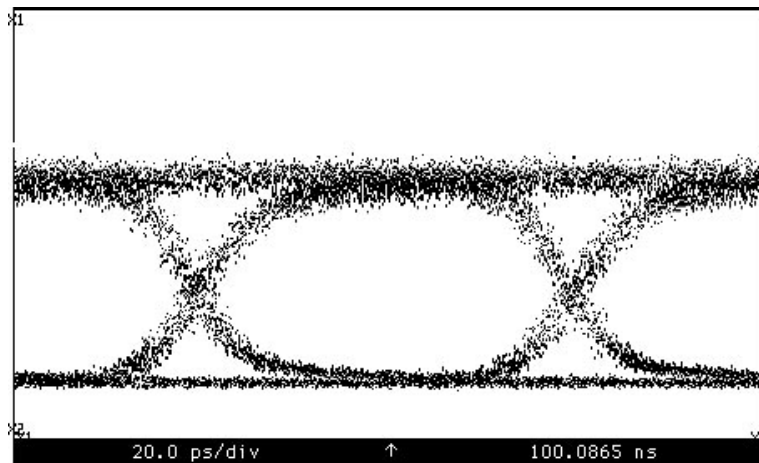
Διάγραμμα 5.13: Eye Diagram για  $\lambda = 1535.82 \text{ nm}$  και  $\text{FSR} = 50 \text{ GHz}$



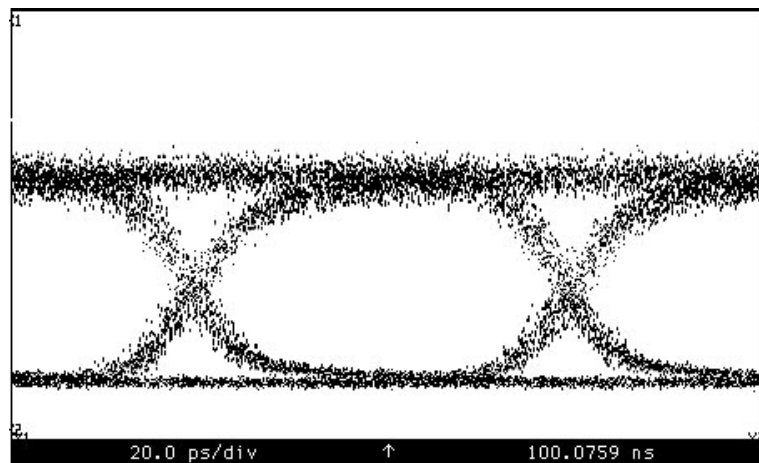
Διάγραμμα 5.14: Eye Diagram για  $\lambda = 1540.16 \text{ nm}$  και  $\text{FSR} = 50 \text{ GHz}$



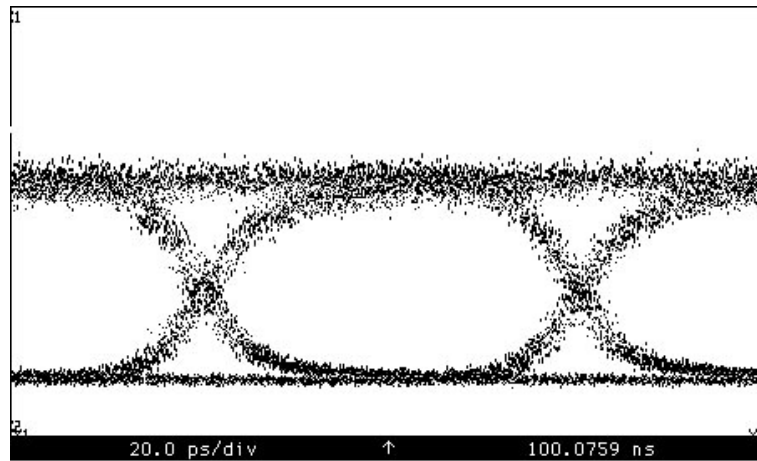
Διάγραμμα 5.15: Eye Diagram για  $\lambda = 1544.13 \text{ nm}$  και  $FSR = 50 \text{ GHz}$



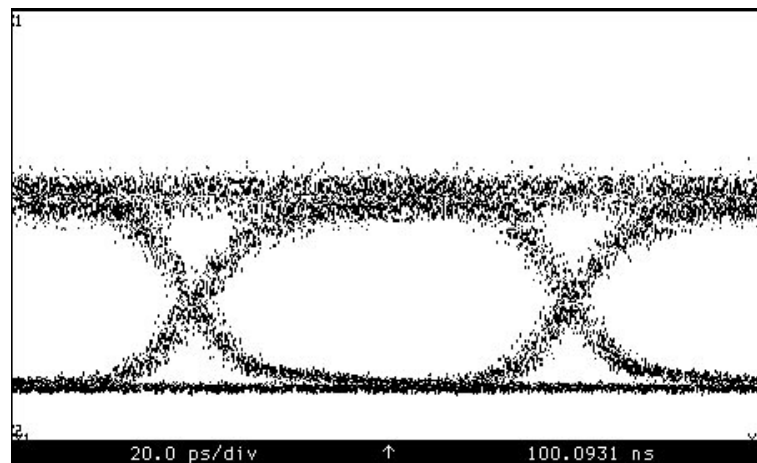
Διάγραμμα 5.16: Eye Diagram για  $\lambda = 1549.32 \text{ nm}$  και  $FSR = 50 \text{ GHz}$



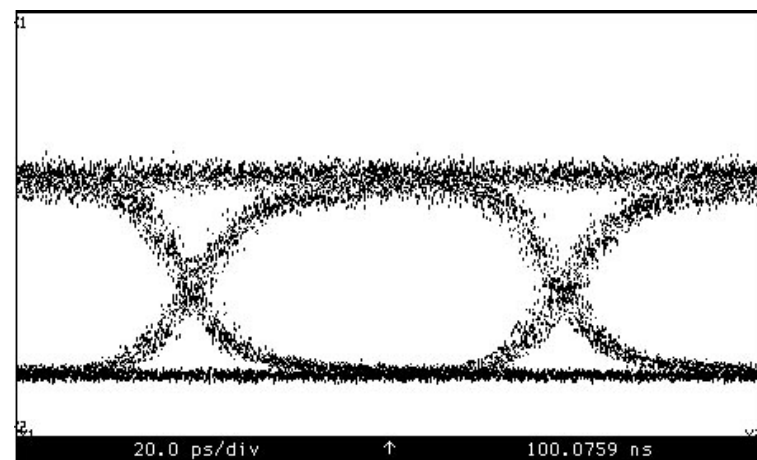
Διάγραμμα 5.17: Eye Diagram για  $\lambda = 1557.77 \text{ nm}$  και  $FSR = 50 \text{ GHz}$



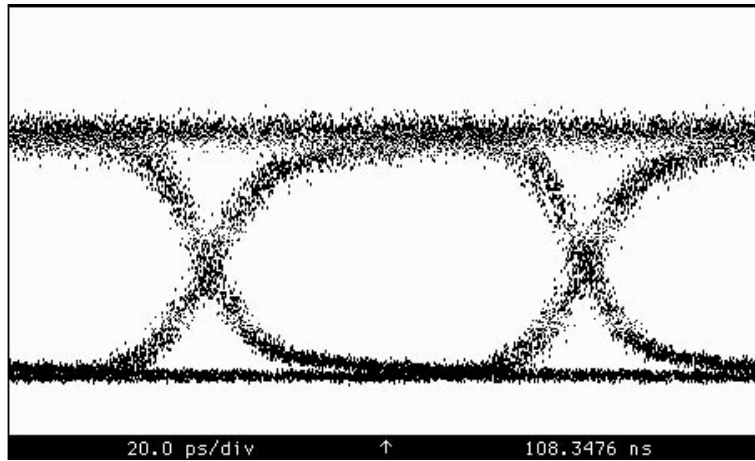
Διάγραμμα 5.18: Eye Diagram για  $\lambda = 1558.17 \text{ nm}$  και  $\text{FSR} = 50 \text{ GHz}$



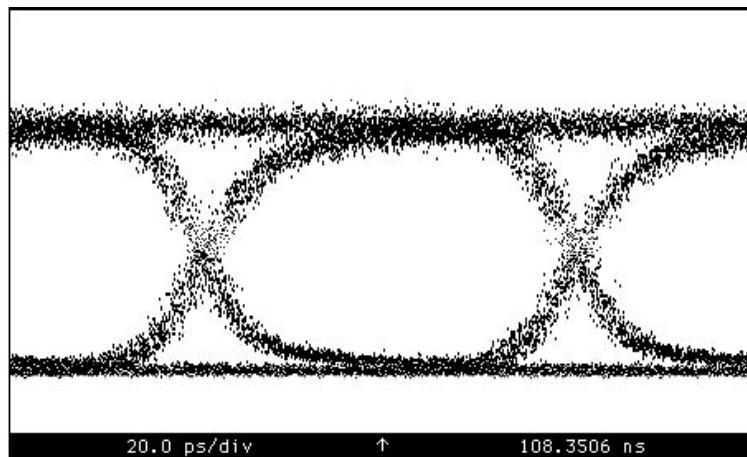
Διάγραμμα 5.19: Eye Diagram για  $\lambda = 1558.69 \text{ nm}$  και  $\text{FSR} = 50 \text{ GHz}$



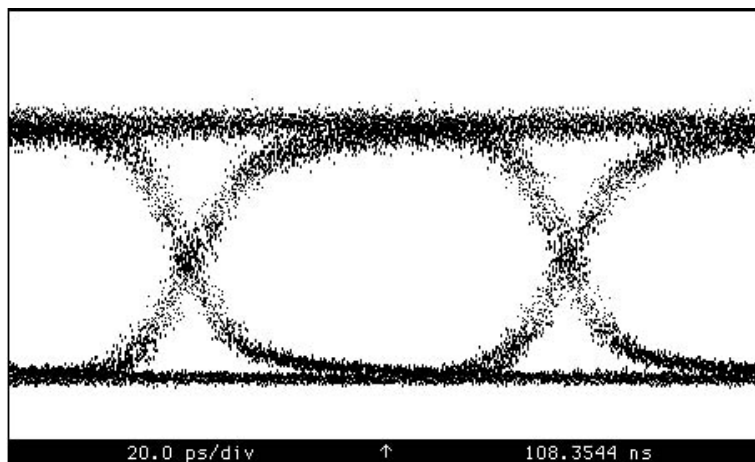
Διάγραμμα 5.20: Eye Diagram για  $\lambda = 1549.32 \text{ nm}$  και  $\text{FSR} = 50 \text{ GHz}$  (DFB laser)



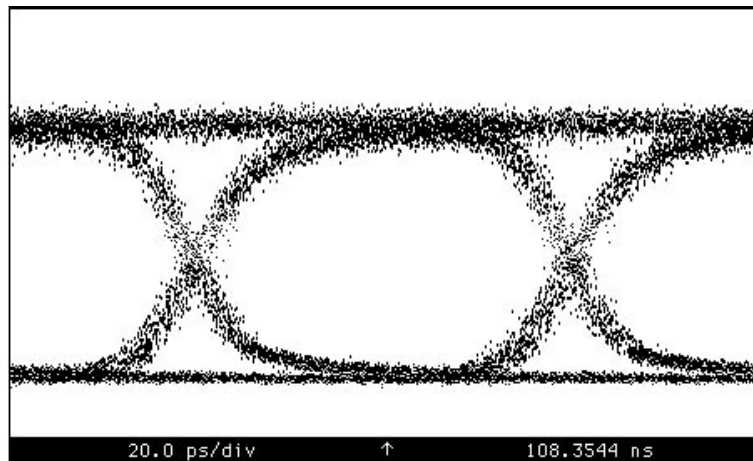
Διάγραμμα 5.21: Eye Diagram για  $\lambda = 1535.82 \text{ nm}$  και  $FSR = 100 \text{ GHz}$



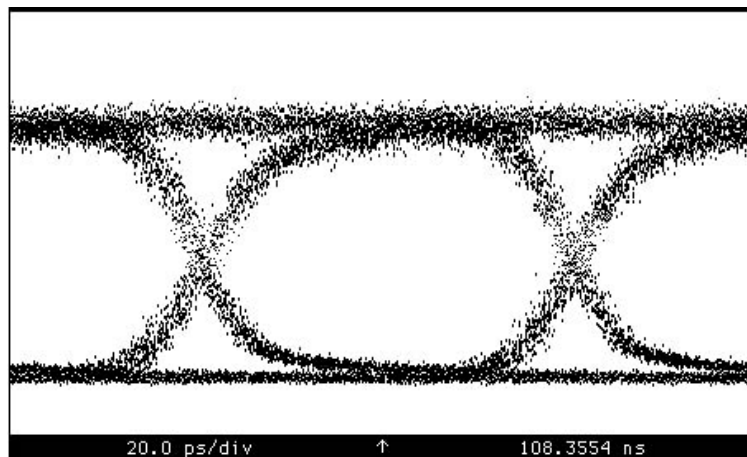
Διάγραμμα 5.22: Eye Diagram για  $\lambda = 1540.56 \text{ nm}$  και  $FSR = 100 \text{ GHz}$



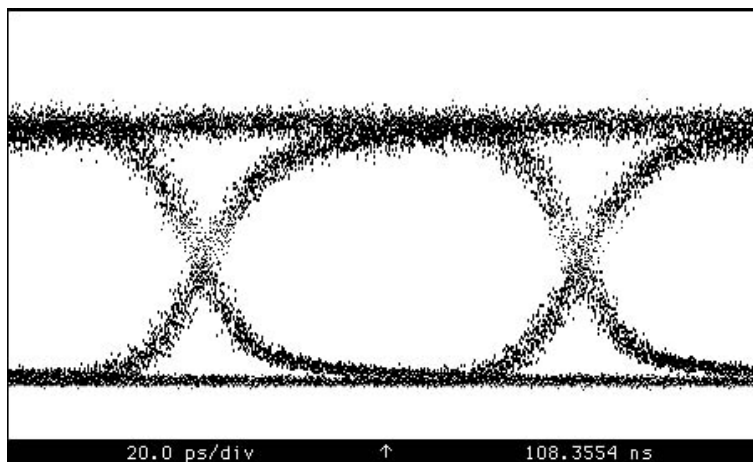
Διάγραμμα 5.23: Eye Diagram για  $\lambda = 1544.53 \text{ nm}$  και  $FSR = 100 \text{ GHz}$



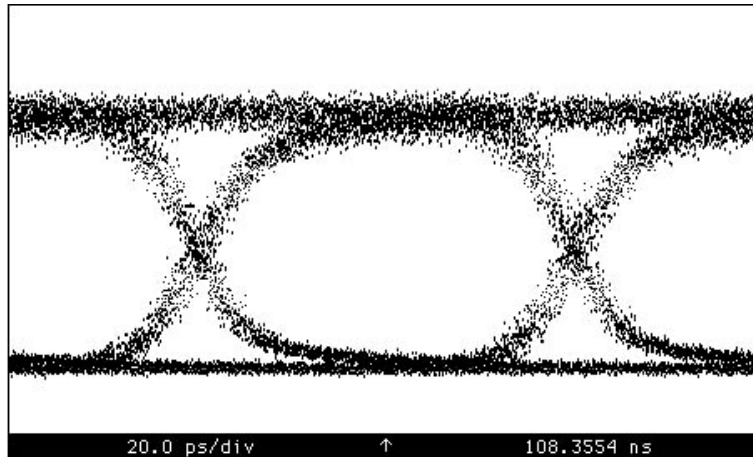
Διάγραμμα 5.24: Eye Diagram για  $\lambda = 1549.32 \text{ nm}$  και  $FSR = 100 \text{ GHz}$



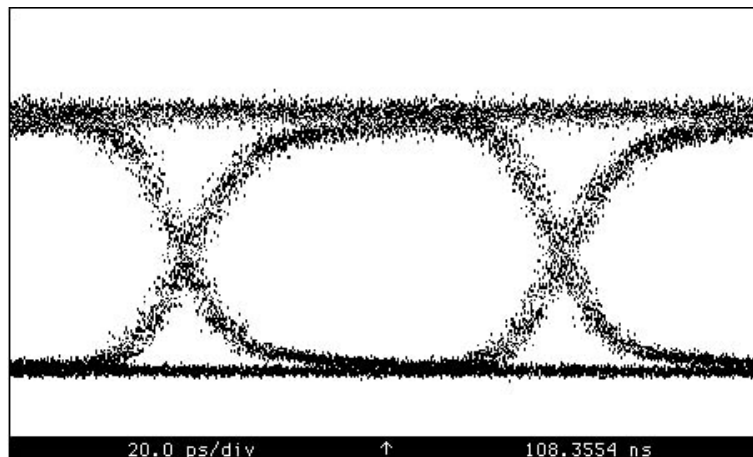
Διάγραμμα 5.25: Eye Diagram για  $\lambda = 1557.36 \text{ nm}$  και  $FSR = 100 \text{ GHz}$



Διάγραμμα 5.26: Eye Diagram για  $\lambda = 1558.17 \text{ nm}$  και  $FSR = 100 \text{ GHz}$



Διάγραμμα 5.27: Eye Diagram για  $\lambda = 1569.59 \text{ nm}$  και  $FSR = 100 \text{ GHz}$



Διάγραμμα 5.28: Eye Diagram για  $\lambda = 1549.32 \text{ nm}$  και  $FSR = 100 \text{ GHz}$  (DFB laser)

Συγκρίνοντας τα προηγούμενα διαγράμματα ματιού με αυτά που λήφθηκαν με πηγή ένα DFB laser δεν παρατηρούμε καμία διαφορά στην ποιότητα των διαγραμμάτων για κάθε κανάλι ξεχωριστά και η επίδοση των καναλιών της πολυκυματικής πηγής είναι παρόμοια με αυτή ενός κοινού εμπορικά διαθέσιμου laser.

#### **5.4.4 Μετρήσεις BER**

Σε τελευταίο στάδιο πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων Bit Error Rate με τη βοήθεια ενός μετρητή BER. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιεί ως είσοδο μια ακολουθία PRBS  $2^{31} - 1$  διαμορφωμένη στα 10 Gbps η οποία διαμορφώνει ένα συγκεκριμένο κανάλι που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση. Ο τύπος αυτής της ακολουθίας έχει την ιδιότητα να έχει τον ίδιο αριθμό 1 και 0 διατεταγμένα σε τυχαίες θέσεις μέσα σε κάθε ριπή δεδομένων που αποστέλλει, με αποτέλεσμα η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται να διατηρείται σταθερή σε μια στάθμη αναφοράς. Στην έξοδο της διάταξης μετρώνται τα εσφαλμένα bit που λαμβάνονται δεδομένου ότι η αρχική ακολουθία είναι γνωστή. Για την επίτευξη λειτουργίας χωρίς λάθη, που εδώ θεωρείται ένα BER της τάξης των  $10^{-9}$ , η ισχύς εισόδου μεταβάλλεται και προκύπτει ένα σύνολο μετρήσεων του τύπου:

$$\log(BER) = f(P_{in}(dBm))$$

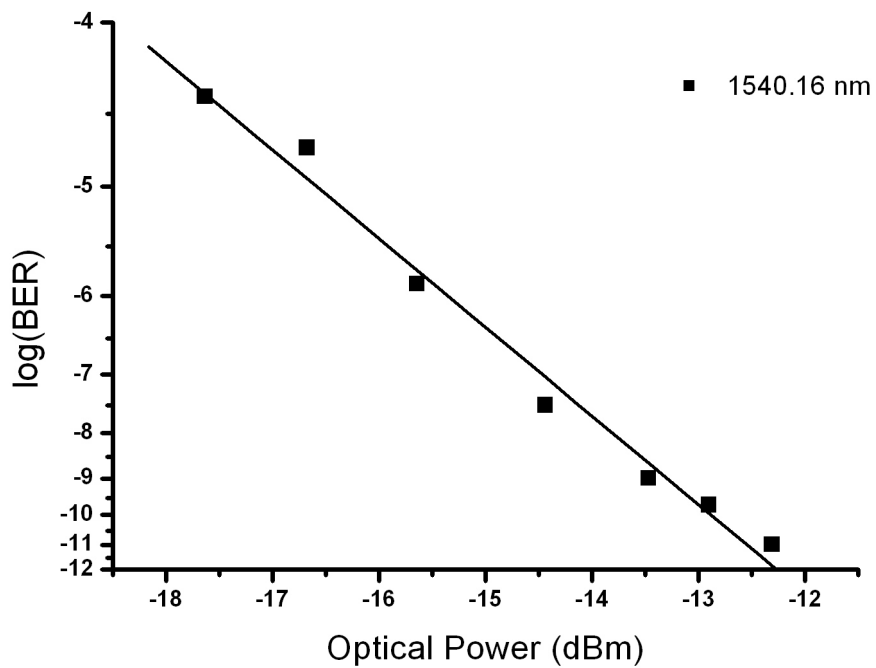
Τα διαγράμματα αυτά όπως και οι πίνακες των τιμών παρατίθενται μεμονωμένα αλλά και σε συγκριτικά διαγράμματα. Επιπλέον, γίνεται και σύγκριση με το ίδιο DFB laser που χρησιμοποιήθηκε και προηγουμένως για την αξιολόγηση της ποιότητας των καναλιών της πηγής, ενώ το FSR για το οποίο λήφθηκαν οι μετρήσεις ήταν 50 και 100 GHz. Στα διαγράμματα αυτά φαίνονται και οι καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων των σημείων που προέκυψαν από τις μετρήσεις.

Ωστόσο σε εμπορικές εφαρμογές τέτοιες τιμές του BER δεν είναι ικανοποιητικές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι αναγκαίο να γίνει μια όσο το δυνατόν καλύτερη βελτιστοποίηση με σκοπό την επίτευξη τιμών BER που είναι της τάξης των  $10^{-15}$ . Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα και γίνεται ένας σύντομος σχολιασμός αυτών:



Optical Power (dBm)	log(BER)
-12,30992	-11,00000
-12,90306	-9,71030
-13,46787	-9,00000
-14,43697	-7,49606
-15,64155	-5,86955
-16,67562	-4,72022
-17,63211	-4,39794

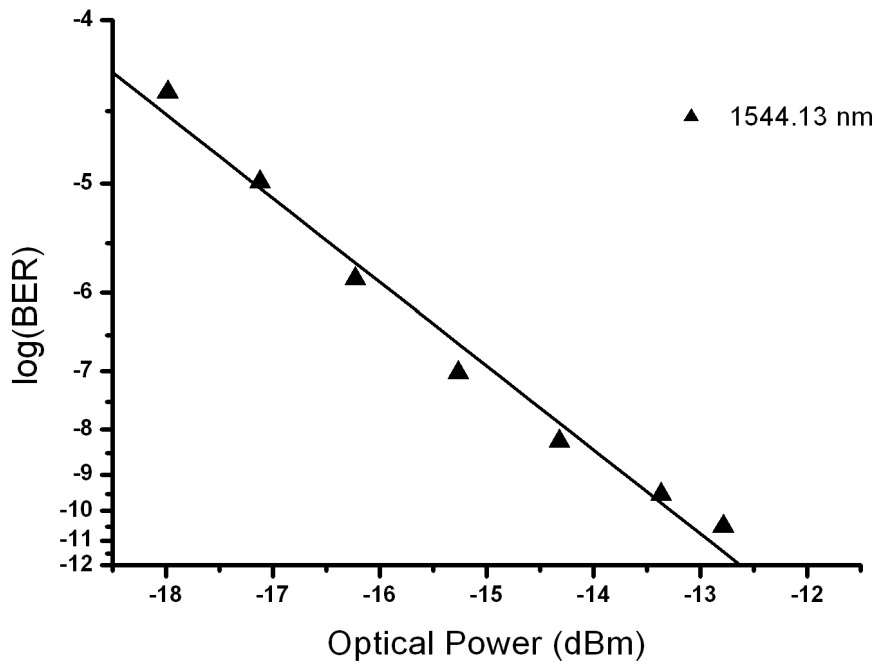
Πίνακας 5.1: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1540.16$  και  $FSR = 50$  GHz



Διάγραμμα 5.29: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1540.16$  και  $FSR = 50$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-12,787	-10,50103
-13,36598	-9,52288
-14,31798	-8,24082
-15,26513	-7,02688
-16,22932	-5,8501
-17,11946	-4,9849
-17,98354	-4,38503

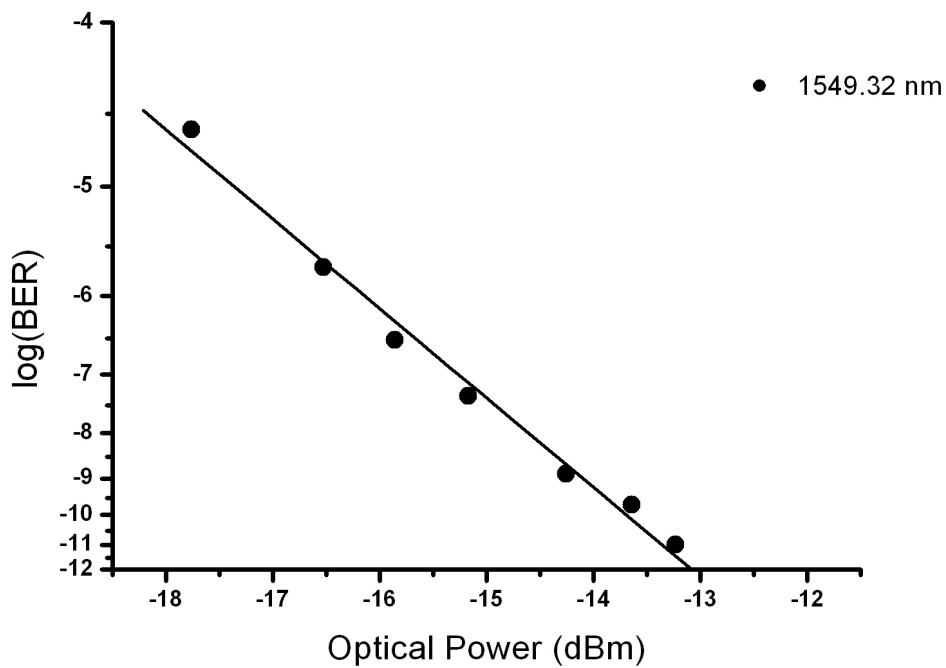
Πίνακας 5.2: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1544.13$  και  $FSR = 50$  GHz



Διάγραμμα 5.30: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1544.13$  και  $FSR = 50$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-13,23306	-11
-13,64014	-9,69897
-14,25969	-8,88606
-15,17513	-7,34288
-15,85739	-6,52288
-16,5267	-5,69897
-17,75985	-4,59794

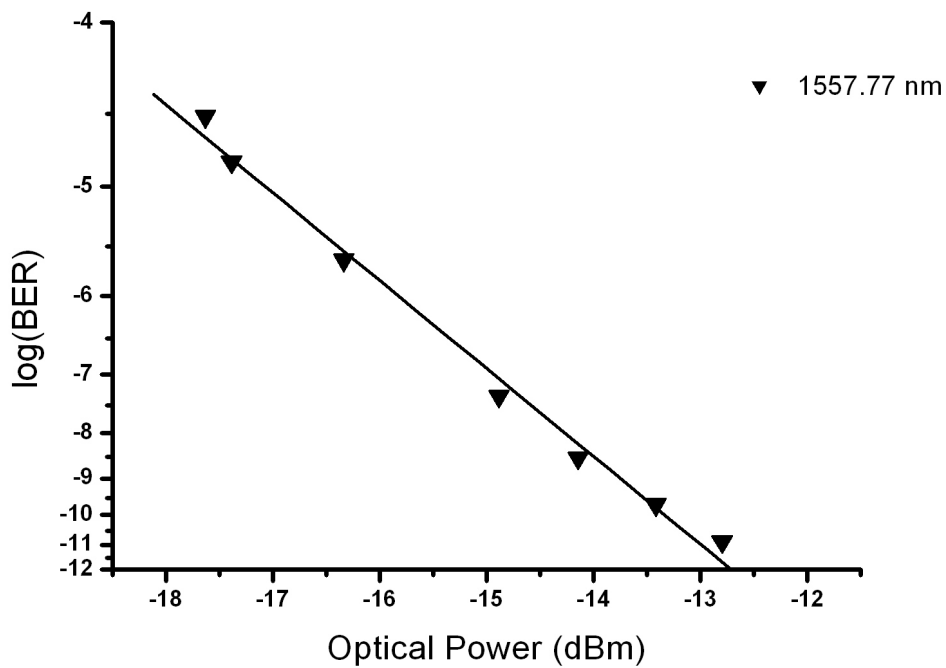
Πίνακας 5.3: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 50$  GHz



Διάγραμμα 5.31: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 50$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-12,79841	-10,88691
-13,41989	-9,69897
-14,14539	-8,52288
-14,88638	-7,34391
-16,33577	-5,62691
-17,38711	-4,81794
-17,63211	-4,51794

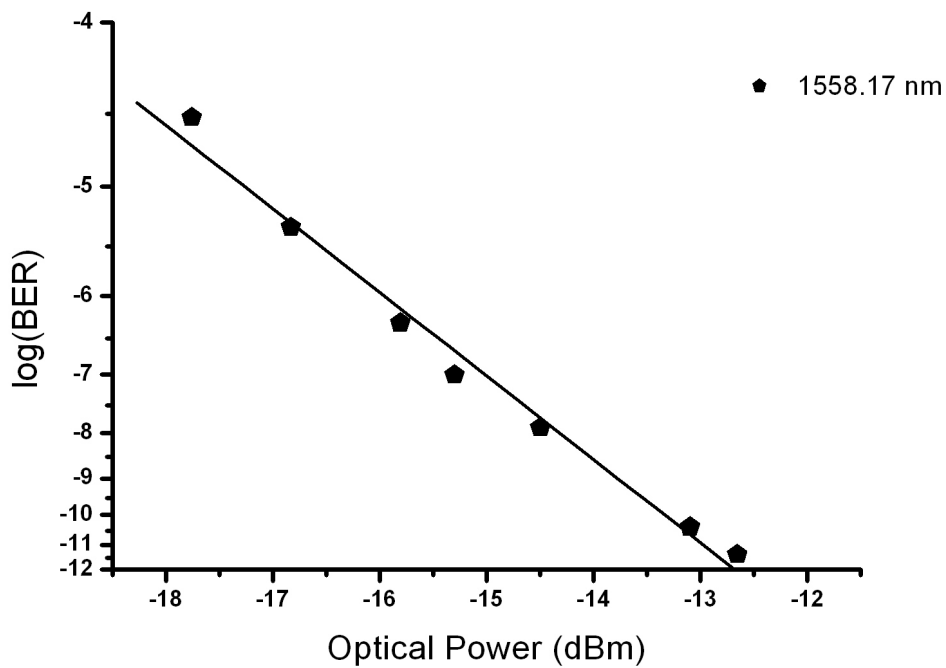
Πίνακας 5.4: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1557.77$  και  $FSR = 50$  GHz



Διάγραμμα 5.32: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1557.77$  και  $FSR = 50$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-12,656	-11,37103
-13,09804	-10,38288
-14,49839	-7,90103
-15,30178	-7,00794
-15,80871	-6,30897
-16,82982	-5,32897
-17,75985	-4,52288

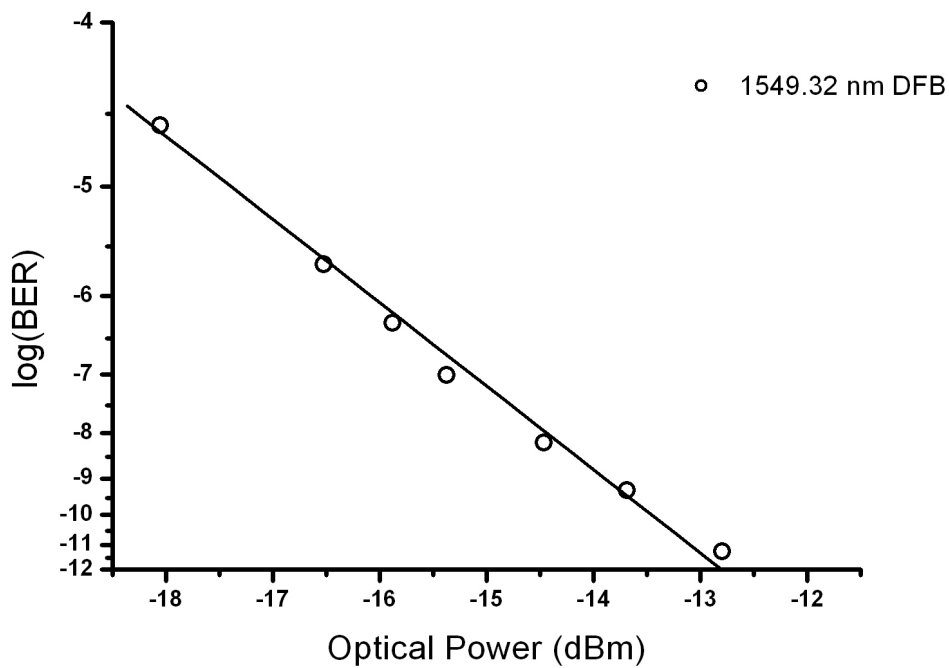
Πίνακας 5.5: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1558.17$  και  $FSR = 50$  GHz



Διάγραμμα 5.33: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1558.17$  και  $FSR = 50$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-12,79841	-11,258
-13,69064	-9,30103
-14,46724	-8,18897
-15,37602	-7,01185
-15,87871	-6,30897
-16,5267	-5,67103
-18,05246	-4,57103

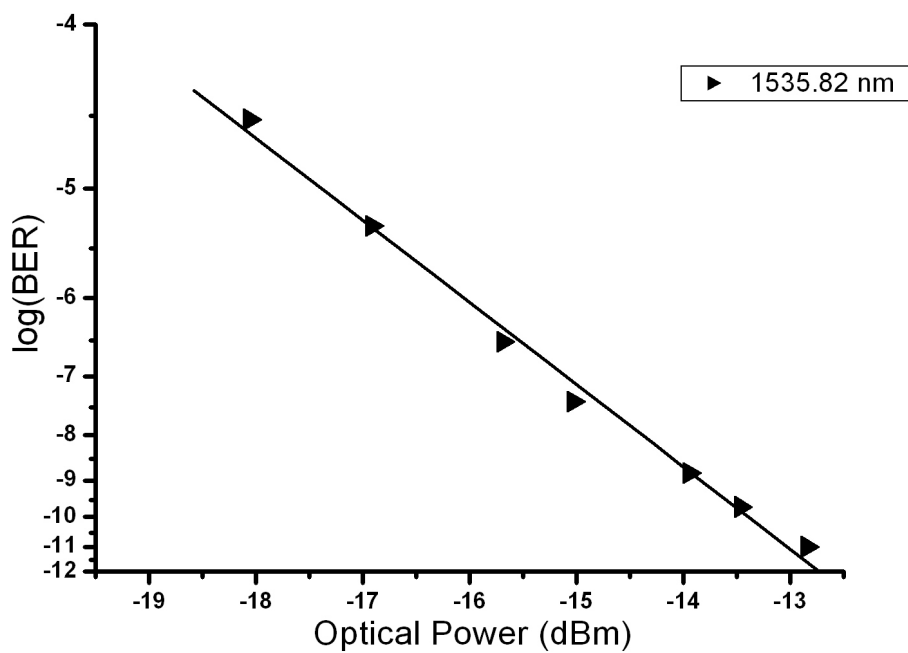
Πίνακας 5.6: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 50$  GHz (DFB laser)



Διάγραμμα 5.34: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 50$  GHz (DFB laser)

Optical Power (dBm)	log(BER)
-12,84306	-11
-13,46532	-9,69897
-13,94539	-8,82391
-15,02982	-7,39794
-15,68906	-6,52288
-16,91481	-5,30103
-18,05828	-4,52288

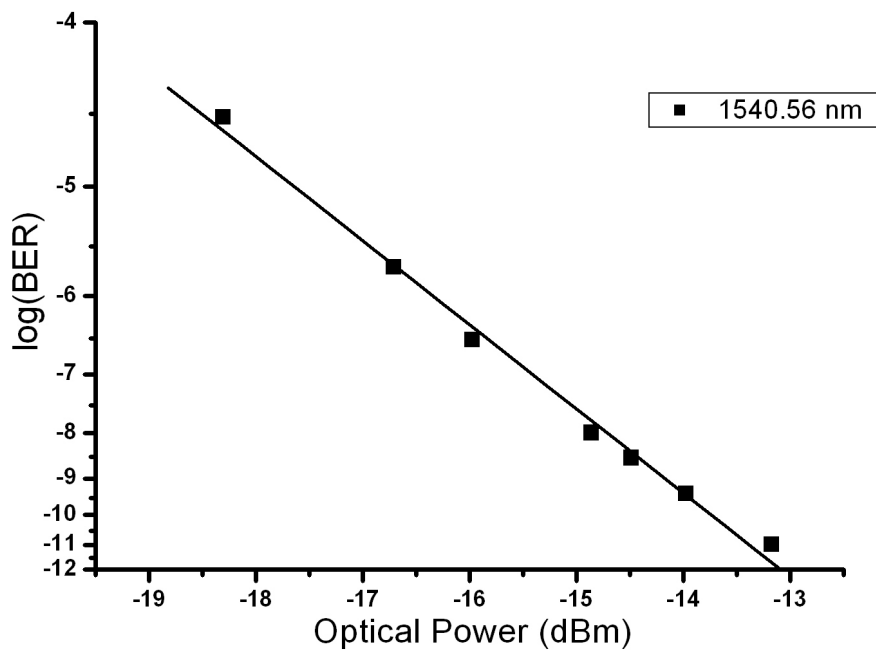
Πίνακας 5.7: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1535.82$  και  $FSR = 100$  GHz



Διάγραμμα 5.35: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1535.82$  και  $FSR = 100$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-13,17306	-11
-13,97369	-9,39794
-14,48521	-8,52288
-14,85978	-8
-15,97482	-6,52288
-16,7097	-5,69897
-18,30551	-4,52288

Πίνακας 5.8: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1540.56$  και  $FSR = 100$  GHz

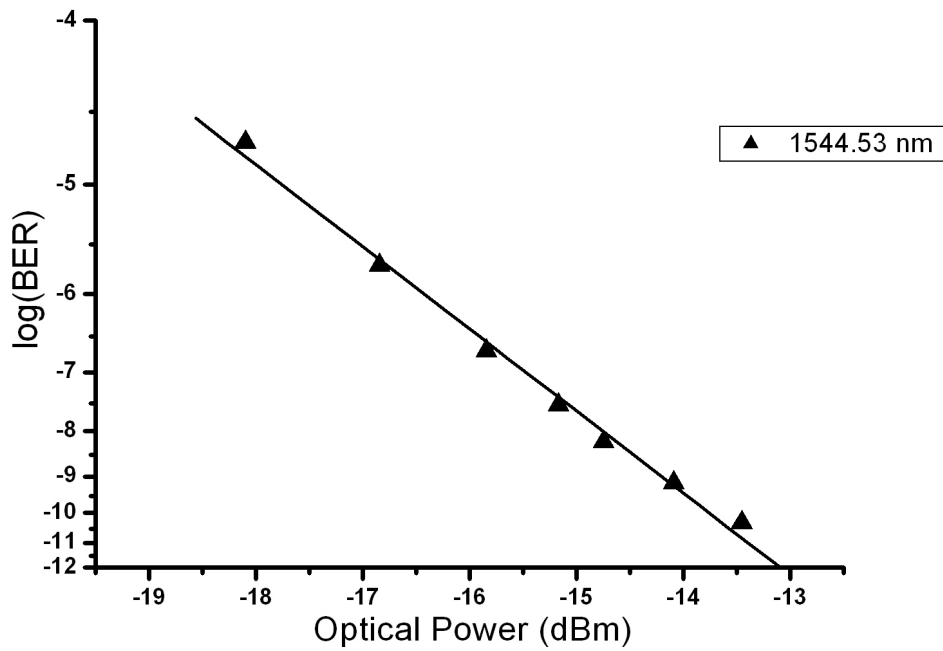


Διάγραμμα 5.36: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1540.56$  και  $FSR = 100$  GHz



Optical Power (dBm)	log(BER)
-13,45547	-10,30103
-14,08874	-9,1549
-14,7485	-8,22185
-15,16817	-7,52288
-15,84419	-6,69897
-16,84433	-5,69897
-18,09985	-4,69897

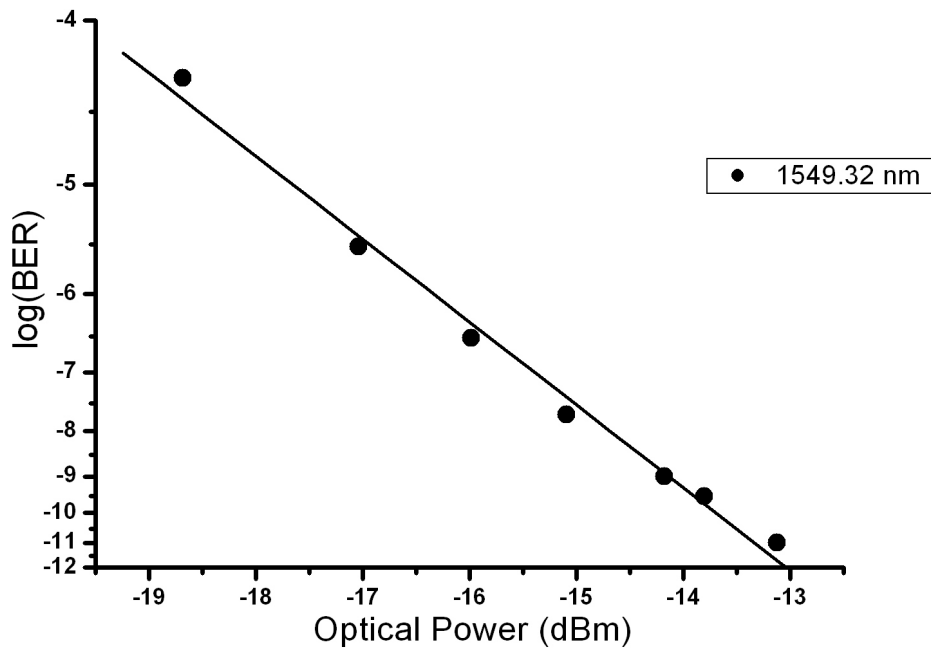
Πίνακας 5.9: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1544.53$  και  $FSR = 100$  GHz



Διάγραμμα 5.37: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1544.53$  και  $FSR = 100$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-13,12211	-11
-13,80663	-9,52288
-14,17707	-9
-15,09362	-7,69897
-15,98932	-6,52288
-17,04246	-5,52288
-18,68551	-4,30103

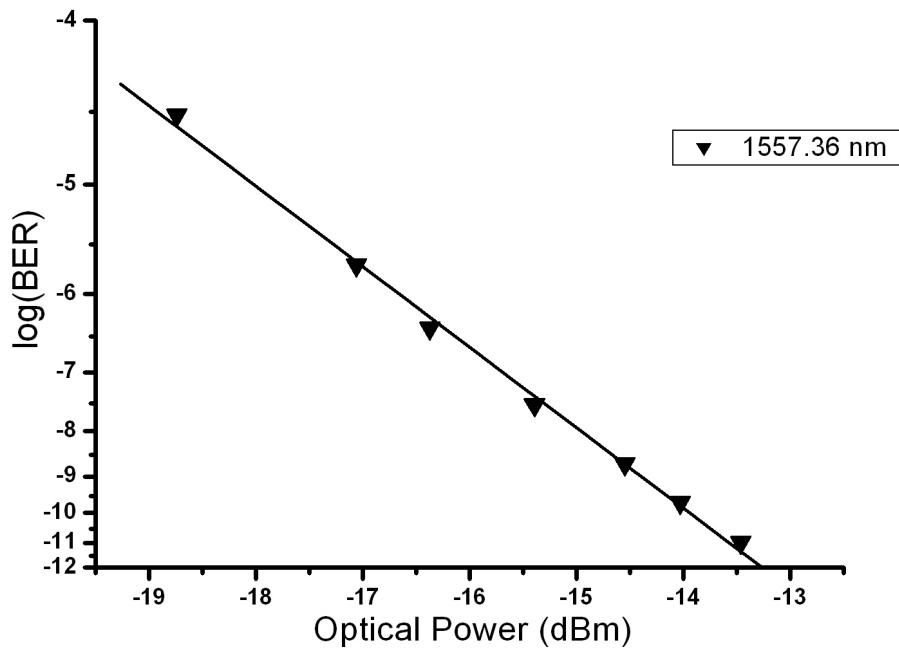
Πίνακας 5.10: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 100$  GHz



Διάγραμμα 5.38: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 100$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-13,46532	-11
-14,03083	-9,69897
-14,54955	-8,69897
-15,3946	-7,52288
-16,37577	-6,39794
-17,05965	-5,69897
-18,74147	-4,52288

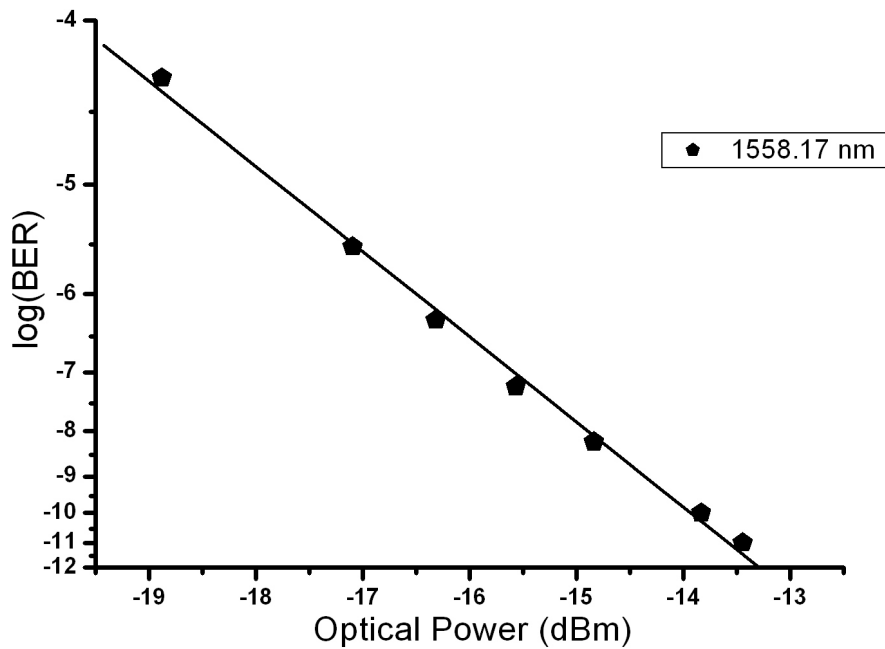
Πίνακας 5.11: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1557.36$  και  $FSR = 100$  GHz



Διάγραμμα 5.39: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1557.36$  και  $FSR = 100$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-13,44611	-11
-13,83534	-10
-14,83774	-8,22185
-15,57036	-7,22185
-16,31919	-6,30103
-17,09569	-5,52288
-18,88208	-4,30103

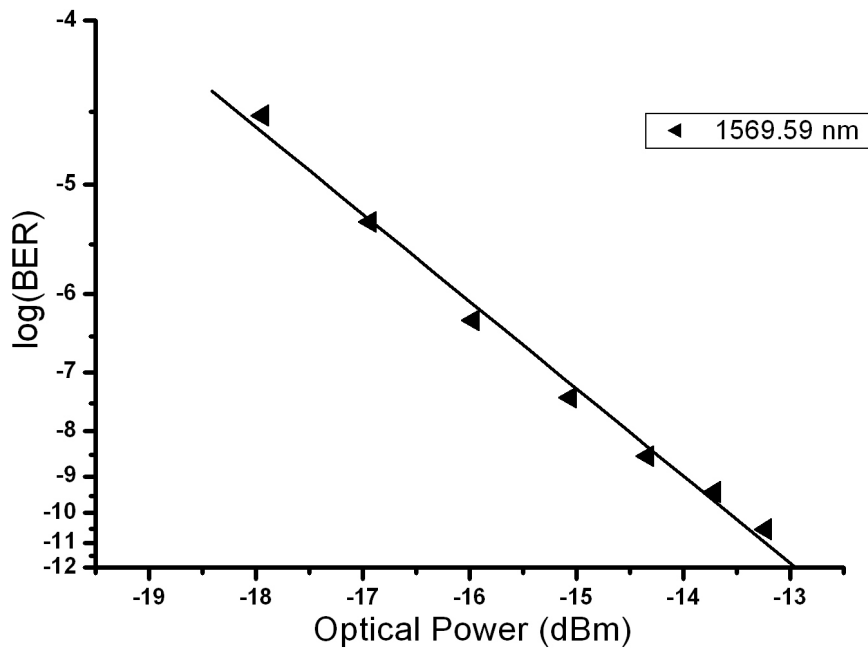
Πίνακας 5.12: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1558.17$  και  $FSR = 100$  GHz



Διάγραμμα 5.40: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1558.17$  και  $FSR = 100$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-13,22894	-10,52288
-13,70711	-9,39794
-14,33486	-8,52288
-15,05767	-7,39794
-15,96789	-6,30103
-16,93246	-5,30103
-17,93802	-4,52288

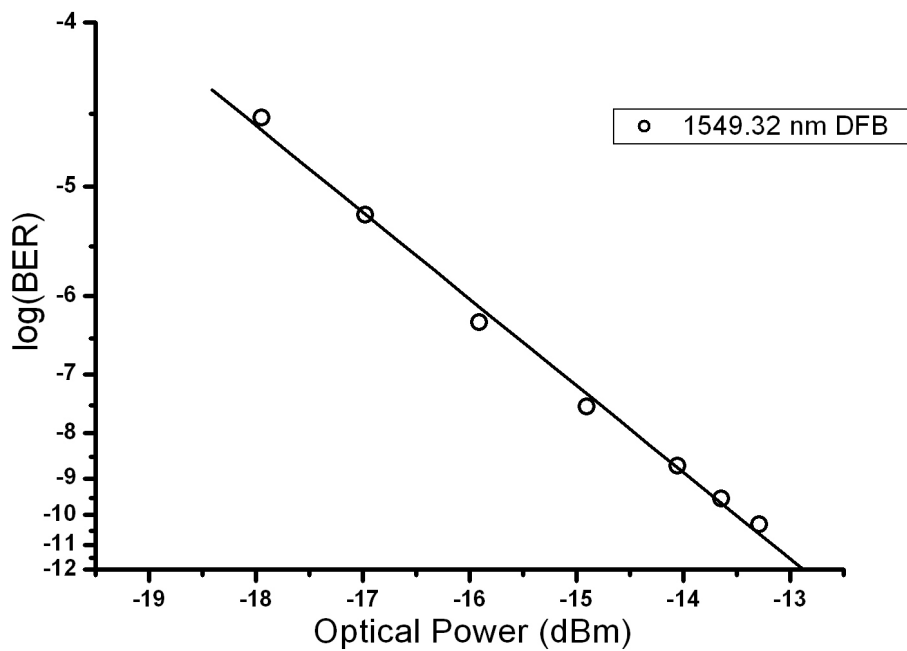
Πίνακας 5.13: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1559.69$  και  $FSR = 100$  GHz



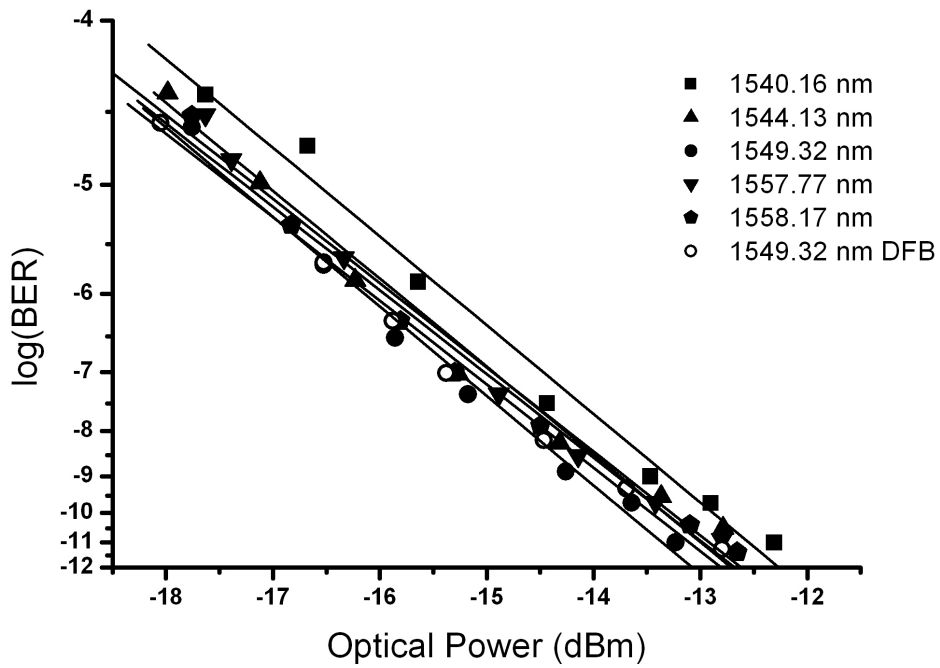
Διάγραμμα 5.41: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1569.59$  και  $FSR = 100$  GHz

Optical Power (dBm)	log(BER)
-13,28804	-10,30103
-13,64576	-9,52288
-14,05528	-8,69897
-14,90702	-7,52288
-15,90834	-6,30103
-16,97982	-5,22185
-17,94737	-4,52288

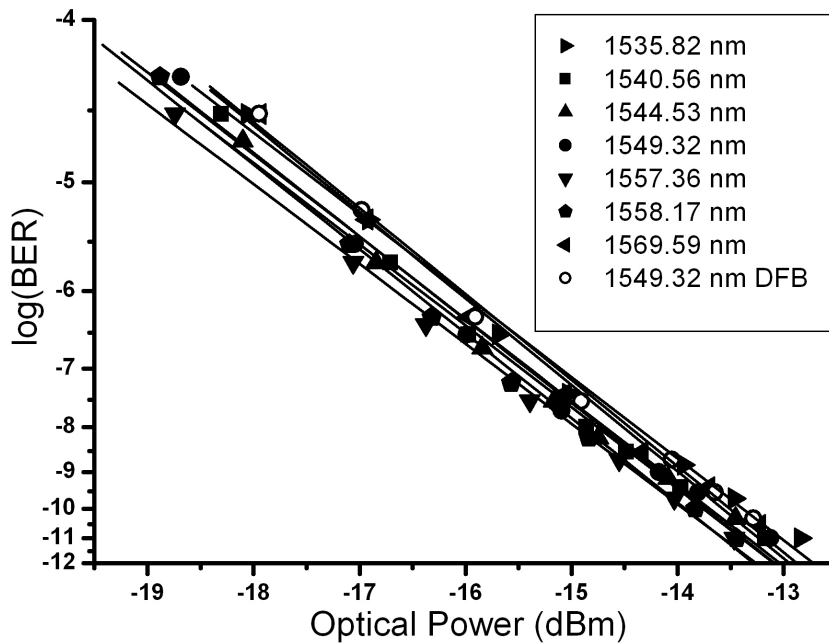
Πίνακας 5.14: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 100$  GHz (DFB laser)



Διάγραμμα 5.42: Μετρήσεις BER για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 100$  GHz (DFB laser)



Διάγραμμα 5.43: Συγκριτικό Διάγραμμα μετρήσεων BER (FSR = 50 GHz)



Διάγραμμα 5.44: Συγκριτικό Διάγραμμα μετρήσεων BER (FSR = 100 GHz)

Τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

- Η εξάρτηση του BER φαίνεται να είναι λογαριθμική με την οπτική ισχύ εισόδου.
- Τα κανάλια που είναι συντονισμένα στο πλέγμα της ITU επιδεικνύουν εξαιρετική επίδοση όσον αφορά τις μετρήσεις BER.
- Από τα συγκριτικά διαγράμματα δεν φαίνεται να υπάρχει διαφορά όσον αφορά την ποιότητα των καναλιών σε σχέση με αυτή του DFB laser.
- Η ποιότητα δεν διαφέρει από κανάλι σε κανάλι πράγμα που καθιστά την πηγή λειτουργική για όλα τα κανάλια που διαθέτει.



# **Κεφάλαιο 6**

## **Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων και Εφαρμογές της Πολυκυματικής Πηγής**

## **6.1 Αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρατέθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα της Πολυκυματικής Πηγής και επιπλέον κάποια αποτελέσματα προσομοιώσεων που έγιναν για τη συγκριτική αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Η Πολυκυματική Πηγή που κατασκευάστηκε και στην οποία έγιναν όλες οι μετρήσεις έχει ως πρωταρχικό σκοπό να αποτελέσει σε τελικό στάδιο μια αξιόπιστη και εμπορικά διαθέσιμη πηγή laser για DWDM Δίκτυα καλύπτοντας όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος καναλιών και συχνοτήτων. Το επιθυμητό εύρος αρχικά είναι τέτοιο ώστε να καλύπτει όλη την C μπάντα της ITU παράγοντας τουλάχιστον τα 100 κανάλια από τα οποία αυτή αποτελείται για απόσταση καναλιών 50 GHz και 50 για απόσταση 100 GHz. Αυτό όπως είδαμε από τα πειραματικά αποτελέσματα είναι εφικτό, αφού τα Συμβολόμετρα Fabry – Pérot που χρησιμοποιήθηκαν για το φασματικό διαχωρισμό στο τελικό στάδιο της πηγής όχι μόνον έχουν υψηλή ακρίβεια στην φασματική απόσταση των 50 και 100 GHz αλλά επίσης παρουσιάζουν εξαιρετική επίδοση στο κλείδωμα τους στο πλέγμα της ITU επιλέγοντας έτσι με ακρίβεια τα κανάλια αυτά.

Το εύρος του αρχικού laser, η ισχύς του και η ποιότητα των παραγόμενων παλμών είναι τέτοια που να επιτρέπει την χρήση του ως αρχική πηγή για την άντληση της οπτικής ισχύος που απαιτείται για την παραγωγή του Supercontinuum. Το γεγονός ότι η συχνότητα του είναι κλειδωμένη στα 12.5 GHz δίνει την δυνατότητα για κατασκευή μιας πηγής η οποία να μπορεί σχετικά εύκολα να παράγει φασματικές συνιστώσες οι οποίες να είναι πολλαπλάσια των 12.5 GHz όπως για παράδειγμα στα 50, 100, 200 και 400 GHz τα οποία ακολουθούνται από τα πρότυπα μετάδοσης της ITU.

Το φάσμα που παράγεται από την οπτική ίνα PCF και το οποίο διαιρείται αποκόποντας κάποιες από τις φασματικές συνιστώσες του με σταθερό βήμα, έχει πολύ μικρές διακυμάνσεις ισχύος και καλύπτει μεγάλο εύρος συχνοτήτων το οποίο αυξάνεται με την αύξηση του

μήκους της οπτικής ίνας όπως έδειξαν τόσο οι προσομοιώσεις όσο και τα πειραματικά αποτελέσματα. Ο τρόπος με τον οποίο παράγεται αυτό το φάσμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως αξιόπιστος και σχετικά χαμηλού κόστους αφού δεν απαιτούνται πολύπλοκες διατάξεις.

Επιπλέον, η ισχύς εξόδου των καναλιών είναι υψηλή, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερης σημασίας όπως επίσης και η καταπίεση των ανεπιθύμητων αρμονικών που είναι της τάξης των 30 dB και είναι σύμφωνη με τις οδηγίες της ITU για πηγές σε DWDM δίκτυα. Ακόμη, η διακύμανση της ισχύος μεταξύ των διαφόρων καναλιών βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα που δεν υπερβαίνουν τα 4 dB για την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιεί την οπτική ίνα PCF μήκους 100 m.

Η επίδοση των παραγόμενων καναλιών σε ζητήματα μετάδοσης είναι πολύ καλή και συγκρινόμενη με αυτή που παρουσιάζουν ορισμένα εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα, όπως τα DFB laser που είναι και η κύρια πηγή που χρησιμοποιείται σε DWDM δίκτυα, παρουσιάζει τουλάχιστον παρόμοια αν όχι καλύτερη επίδοση. Το παραγόμενο φάσμα της εξόδου της διάταξης έχει την ικανότητα διαμόρφωσης κάθε καναλιού ξεχωριστά στα 10 Gbps όπως αυτή μετρήθηκε δημιουργώντας έτσι μια πηγή η οποία είναι ικανή να δώσει ένα συνολικό ρυθμό μετάδοσης που είναι της τάξης του 1 Tbps για την C μπάντα και των 3 Tbps για όλη τη ζώνη μετάδοσης των 1550 nm. Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης αυτός είναι εφικτός για μια κοινή οπτική ίνα μετάδοσης. Ωστόσο, δεν είναι εύκολο να κατασκευαστούν αμιγώς οπτικοί ενισχυτές οι οποίοι να μπορούν ταυτόχρονα να ενισχύουν όλα τα φασματικά κανάλια αυτά αφού το εύρος ζώνης τους είναι σχετικά περιορισμένο.

Η σχεδίαση ενός συστήματος Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος με ένα τόσο μεγάλο αριθμό καναλιών δεν είναι μια εύκολη υπόθεση αφού σε κάθε περίπτωση απαιτεί την κλιμάκωση πολλών λειτουργιών του δικτύου σε μια διάταξη. Η αύξηση του συνολικά μεταδιδόμενου ρυθμού μπορεί επιπλέον να επιτευχθεί και με την χρήση Οπτικής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Χρόνου αυξάνοντας ταυτόχρονα και το ρυθμό μετάδοσης κάθε καναλιού. Σε αντίθεση με αυτό, τα συστήματα OTDM λύνουν κάποια από τα προβλήματα που εμφανίζονται στα DWDM δίκτυα αλλά σημαντικό μειονέκτημα αυτής είναι ότι με την υπερβολική αύξηση του

ρυθμού εμφανίζονται εντονότερα φαινόμενα διασποράς στο σύστημα. Έτσι, η σχεδίαση ενός Οπτικού Δικτύου δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν μια διαδικασία που ακολουθεί μια από τις δύο αυτές τεχνολογίες, αλλά περισσότερο σαν μια διαδικασία στην οποία και οι δύο τεχνολογίες είναι απαραίτητες. Ωστόσο, η εύρεση του βέλτιστου σημείου για την επίδοση των συστημάτων μετάδοσης όσον αφορά ζητήματα χωρητικότητας δεν είναι μια εύκολη υπόθεση αλλά απαιτεί τον συνυπολογισμό πολλών παραγόντων.

Παρ' όλα αυτά, η Πολυκυματική Πηγή που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε έχει την δυνατότητα να παράγει όλα αυτά τα διατιθέμενα κανάλια και να συντονίζεται ανάλογα με το ποια από αυτά είναι σε χρήση σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή. Το βασικό και προφανές συγκριτικό πλεονέκτημα της Πολυκυματικής Πηγής είναι η ικανότητά της να παράγει ταυτόχρονα όλα τα μήκη κύματος σε αυτό το εύρος συχνοτήτων. Η λύση που ως τώρα εφαρμόζεται στα Δίκτυα Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος βασίζεται σε πολλά διαφορετικά DFB laser, καθένα από τα οποία παράγει ένα και μόνο μήκος κύματος. Καθένα από τα μεμονωμένα laser αυτά έχει ανάγκη από ένα ξεχωριστό τροφοδοτικό για την απαιτούμενη έγχυση ρεύματος και από άλλο ένα για τον ελεγκτή ψύξης. Από την άλλη, η πηγή απαιτεί τροφοδοτικά μονάχα για το ERGO laser και τον EDFA. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη πολυπλοκότητα στην κατασκευή και δυσκολία στην ολοκλήρωση, αφού απαιτείται πολλαπλάσιος χώρος στην επιφάνεια του ημιαγωγού για την παραγωγή όλων των μηκών κύματος σε μια συσκευή. Επιπλέον, το ολικό κόστος είναι απαγορευτικά υψηλό για τις συστοιχίες των DFB laser ιδιαίτερα όταν οι απαιτήσεις για το πλήθος των μηκών κύματος αυξάνονται. Η Πολυκυματική Πηγή που προτείνεται μπορεί εύκολα να κατασκευαστεί με χαμηλό κόστος. Λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής, η πηγή μπορεί να αποτελέσει μια πιθανή λύση ως πομπού ακόμη και σε Συστήματα Μετάδοσης Μήκους Κύματος τοπικής εμβέλειας. Στη συνέχεια παρατίθεται ένας συγκριτικός πίνακας που αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της προτεινόμενης Πολυκυματικής Πηγής σε Δίκτυα WDM:

<b>Ιδιότητες</b>	<b>Εμπορικά Διαθέσιμα DFB laser</b>	<b>Προτεινόμενη Πολυκυματική Πηγή</b>
<b>Ταυτόχρονη παραγωγή πολλών καναλιών</b>	Χαμηλή	Υψηλή
<b>Απαιτήσεις Τροφοδοσίας</b>	Υψηλές (Ξεχωριστή για κάθε laser)	Χαμηλές (μόνο ERGO laser και EDFA)
<b>Κλιμάκωση</b>	Δύσκολη	Δεν απαιτείται
<b>Όγκος – Επιφάνεια</b>	Μεγάλος	Μικρός
<b>Κόστος Κατασκευής</b>	Υψηλό	Χαμηλό
<b>Ευαισθησία σε θερμικές μεταβολές</b>	Μέτρια (Απαιτείται μηχανισμός ελέγχου για κάθε laser ξεχωριστά)	Χαμηλή (Απαιτείται μηχανισμός ελέγχου μόνο για το ERGO laser)
<b>Συντονισμός στο ITU Grid</b>	Μεμονωμένα σε κάθε laser	Ταυτόχρονα για όλα τα κανάλια

*Πίνακας 6.1: Σύγκριση Πολυκυματικής Πηγής με εμπορικά διαθέσιμα DFB laser*

## **6.2 Εναλλακτικές εφαρμογές της Πολυκυματικής Πηγής**

Η Πολυκυματική Πηγή που κατασκευάστηκε και εξετάστηκε πειραματικά παρά το γεγονός ότι έχει ως κύριο σκοπό να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των DWDM δικτύων, παρέχει δυνατότητες και για άλλες εφαρμογές οι οποίες είτε αφορούν τα Οπτικά Δίκτυα, είτε όχι. Η πλειοψηφία των εναλλακτικών εφαρμογών σχετίζεται κατά κύριο λόγο με Απεικόνιση Βιολογικών ιστών και κατ' επέκταση άλλες πιθανές μορφές Τομογραφίας. Στο κείμενο που ακολουθεί δίνεται περισσότερη έμφαση σε εφαρμογές που δεν έχουν σχέση με την Φωτονική

Τεχνολογία που αφορά τις Τηλεπικοινωνίες αλλά περισσότερο σε εφαρμογές Μετρολογίας αλλά και Βιοϊατρικές Απεικονιστικές εφαρμογές. Ο κλάδος αυτός τα τελευταία χρόνια εμφανίζει μια αυξανόμενη τάση προς την Οπτική Τεχνολογία για την ανάπτυξη νέων μεθόδων και τεχνικών και για το λόγο αυτό παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον.

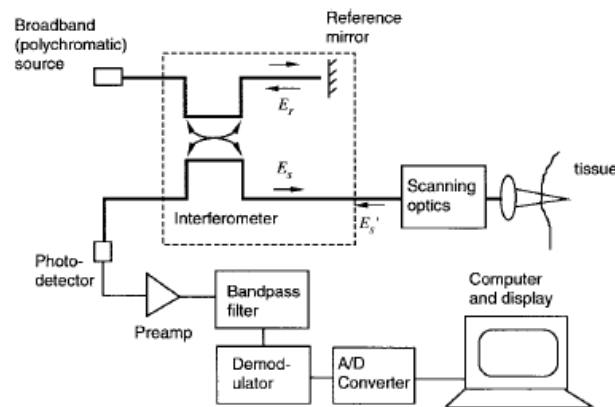
### **6.2.1 Εφαρμογές Μετρολογίας**

Η συχνότητα ενός φυσικού φαινομένου είναι από τα φυσικά μεγέθη τα οποία μπορούν να μετρηθούν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια [1]. Σε αυτό έχει συμβάλει σε μεγάλο βαθμό και η οπτική τεχνολογία παρέχοντας φασματικές πηγές οι οποίες έχουν την ικανότητα παραγωγής φασματικών συνιστωσών σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Επιπλέον, απαιτείται εξαιρετική ακρίβεια στην απόσταση μεταξύ των αρμονικών. Η πηγή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια πηγή αναφοράς και η μέτρηση στην συνέχεια να γίνεται με τη σύγκριση μεταξύ των αρμονικών αυτών και του υπό μέτρηση σήματος. Μια άλλη παραλλαγή της εφαρμογής αυτής είναι η κατασκευή ατομικών οπτικών ρολογιών. Για την κατασκευή ενός ατομικού οπτικού ρολογιού, μια πηγή είναι απαραίτητη για τη σταθεροποίηση μιας συχνότητας αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό η πληροφορία που πηγάζει από τη φάση του οπτικού σήματος μεταφέρεται στο μικροκυματικό πεδίο.

### **6.2.2 Οπτική Τομογραφία Συνοχής Φάσης (Optical Coherence Tomography)**

Η Οπτική Τομογραφία Συνοχής Φάσης είναι μια συμβολομετρική, μη – ιονίζουσα τεχνική απεικόνισης που είναι δυνατόν να προσφέρει διείσδυση μερικών  $\mu\text{m}$  (2 – 3  $\mu\text{m}$  σε βιολογικούς ιστούς) με αξονική και πλευρική ανάλυση της τάξης των  $\mu\text{m}$  [2]. Η τεχνική αυτή εμφανίστηκε το 1991 για πρώτη φορά και μέχρι το 2001 είχε επιτευχθεί ανάλυση σε κλίμακα μικρότερη από 1  $\mu\text{m}$ . Ιδιαίτερη αποδοχή έχει βρει

αυτή η τεχνική στην Οφθαλμολογία αλλά και σε άλλες βιοϊατρικές εφαρμογές. Στη συμβατική συμβολομετρία, η συμβολή του φωτός μπορεί να συμβαίνει σε απόσταση πολλών μέτρων από την πηγή. Σε αντίθεση με αυτό στην OCT η συμβολή του φωτός γίνεται σε κλίμακα της τάξης των  $\mu\text{m}$  με τη βοήθεια των πολυκυματικών πηγών με μεγάλο εύρος ζώνης. Το φως σε ένα σύστημα OCT διαιρείται σε δυο τμήματα, ένα στο οποίο γίνεται η δειγματοληψία όπου και περιέχει το δείγμα και σε ένα τμήμα αναφοράς όπου συνήθως υπάρχει ένα κάτοπτρο. Ο συνδυασμός των δύο ανακλώμενων αυτών δειγμάτων συμβάλει ενισχυτικά μόνο αν η διαφορά δρόμων που ακολουθούν είναι μικρότερη από το μήκος συνοχής (coherence length).



Σχήμα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση Διάταξης OCT με Συμβολόμετρο Michelson [2]

Στην OCT στο πεδίο του χρόνου, το μήκος της διαδρομής του άξονα αναφοράς μπορεί να εκφραστεί σε χρονικούς όρους. Η ιδιαιτερότητα της τεχνικής αυτής είναι το γεγονός ότι η μεταφερόμενη πληροφορία διατηρείται για μήκη οπτικής διαδρομής μικρότερα του μήκους συνοχής. Στη γενική περίπτωση το ένα μέρος του πεδίου  $E_r$  χρησιμοποιείται ως αναφορά και το υπόλοιπο  $E_s$  είναι το πεδίο που οδεύει προς το υπό μέτρηση αντικείμενο. Το σκεδαζόμενο πεδίο  $E_s'$  από το υπό εξέταση αντικείμενο μαζί με το ανακλώμενο πεδίο συμβάλλουν στον φωτοανιχνευτή και η ισχύς του πεδίου που συμβάλλει είναι:

$$I_d = 0.5(I_r + I_s') + \text{Re}\left\{\left\langle E_r^*(t+\tau)E_s'(t) \right\rangle\right\} \quad (6.1)$$

Η πληροφορία αυτή στη γενική περίπτωση είναι η Ετεροσυσχέτιση των δύο αυτών σημάτων:

$$\operatorname{Re}\left\{\left\langle E_r^*(t+\tau)E'_s(t) \right\rangle\right\} = |G(\tau)| \cos[2\pi\nu_0\tau + \phi(\tau)] \quad (6.2)$$

όπου  $G(\tau)$  είναι ο μιγαδικός βαθμός συνοχής φάσης:

$$G(\tau) = \exp\left[-\left(\frac{\pi\Delta\nu\tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right] \cdot \exp(-j2\pi\nu_0\tau) \quad (6.3)$$

όπου  $\Delta\nu$  το φασματικό εύρος της πηγής και  $\nu_0$  αντιστοιχεί στην κεντρική συχνότητα της πηγής και συνδέεται με την φασματική πυκνότητα ισχύος της πηγής:

$$G(\tau) = \int_0^\infty S(\nu) \exp(-j2\pi\nu\tau) d\nu \quad (6.4)$$

και έτσι είναι:

$$S(\nu) = \frac{2\sqrt{\ln 2/\pi}}{\Delta\nu} \exp\left[-4\ln 2\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)^2\right] \quad (6.5)$$

Η αξονική και η πλευρική ανάλυση μπορούν να αποσυσχετιστούν μεταξύ τους αν η πρώτη θεωρηθεί ότι είναι ισοδύναμη του μήκους συνοχής και η δεύτερη μια άλλη οπτική συνάρτηση. Η αξονική ανάλυση δίνεται από:

$$l_c = \frac{2\ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \approx 0.44 \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (6.6)$$

Αν πραγματοποιήσουμε τους υπολογισμούς για το φάσμα του αρχικού παλμού laser με κεντρική συχνότητα στα 1548.91 nm και εύρος 2.7 nm θα προκύψει ότι το μήκος συνοχής είναι ~391 μm. Στην έξοδο της πηγής μας το φάσμα δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί. Ωστόσο αν υποθέσουμε ότι η διακύμανση του φάσματος εξόδου δεν υπερβαίνει τα 4 dB για εύρος συχνοτήτων περίπου 80 nm τότε εκτιμάται ότι η πηγή μπορεί να παρέχει ένα μήκος συνοχής της τάξης των μερικών δεκάδων μm.

Στην εξίσωση 6.3 η περιβάλλουσα Gauss είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος από ένα οπτικό φέρον. Η φυσική ερμηνεία του μεγίστου της συνάρτησης αυτής είναι ότι αυτό επιτυγχάνεται μόνο όταν η απόσταση που διανύεται είναι ακριβώς ίση με αυτή που λαμβάνεται ως



αναφορά και επιπλέον εξαρτάται από την ανακλαστικότητα της επιφάνειας. Το οπτικό φέρον που προκύπτει οφείλεται στο φαινόμενο Doppler. Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι η διαμόρφωση της συχνότητας αυτής προκύπτει από την ταχύτητα με την οποία κινείται η διάταξη που σαρώνει τη μια από τις δύο δέσμες. Η μετατόπιση της συχνότητας αυτής λόγω φαινομένου Doppler είναι:

$$f_D = \frac{2 \cdot v_0 \cdot v_s}{c} \quad (6.4)$$

Οι βασικές προϋποθέσεις που πρέπει μια ικανοποιεί μια οπτική πηγή που προορίζεται για OCT είναι:

- A. Εκπομπή στο εγγύς υπέρυθρο (βέλτιστη ανάλυση: 1200 – 1800 nm).
- B. Μικρό μήκος συνοχής για υψηλότερη ανάλυση.
- C. Υψηλή συγκέντρωση της δέσμης.

Ως τώρα έχει δειχθεί μια εφαρμογή η οποία χρησιμοποιεί μια οπτική ίνα με μικροδομή για την παραγωγή του φάσματος εισόδου στην οπτική πηγή [3] που ωστόσο δεν έχει επιτύχει θεαματικά αποτελέσματα.

### **6.2.3 Απεικόνιση με σήματα φάσματος THz**

Μέχρι πρόσφατα η επίδραση της ακτινοβολίας που βρίσκεται στην φασματική περιοχή των THz (30  $\mu\text{m}$  – 1 mm) με την ύλη δεν είχε ερευνηθεί διεξοδικά λόγω έλλειψης ποιοτικών πηγών ακτινοβολίας σε αυτή την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος [4]. Ωστόσο, η πίεση για την ανάπτυξη τέτοιων πηγών προέκυψε από δυο διαφορετικές συνισταμένες, η πρώτη από την περιοχή της Φασματοσκοπίας και η δεύτερη από την περιοχή της Ραδιοαστρονομίας.

Από τη μεριά του κλάδου που ασχολείται με τη μελέτη των φασμάτων THz, η ακτινοβολία αυτή έχει δύο σημαντικά πλεονεκτήματα [5]: **a)** Αφενός προσφέρει υψηλή ανάλυση λόγω της διεισδυτικότητάς της σε μη – αγώγιμα υλικά και **b)** Είναι Μη – Ιοντίζουσα ακτινοβολία

στην αλληλεπίδρασή της με βιολογικούς ιστούς και αλληλεπιδρά μόνο θερμικά με αυτούς.

Ως τώρα πολλές εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής έχουν εμφανιστεί κυρίως στην διαγνωστική, στην αναγνώριση πρωτεϊνικών δομών, στην απεικόνιση πρόσδεσης υποδοχέων αλλά και στην απεικόνιση των μορίων του DNA αφού μπορεί να προσφέρει ανάλυση εικόνων στην υποχιλιοστομετρική κλίμακα.

Οι δύο βασικοί μηχανισμοί που επιδρούν στη διάδοση της H/M ακτινοβολίας σε βιολογικούς ιστούς είναι η απορρόφηση και η σκέδαση. Η απορρόφηση του καθαρού νερού στην περιοχή αυτή είναι πολύ υψηλή και φτάνει ακόμη και σε τιμές της σταθεράς απορρόφησης της τάξης των  $500 \text{ cm}^{-1}$  που ισοδυναμεί με  $2000 \text{ dB/cm}$ . Ωστόσο, η ακτινοβολία αυτή παρά το γεγονός ότι έχει απορροφητικότητα που είναι απαγορευτική για την χρησιμοποίηση της ως μηχανισμό απεικόνισης, εμφανίζει καλές ιδιότητες όσον αφορά την ανακλαστικότητα. Πιο συγκεκριμένα, ενώ κοντά στο  $1 \text{ GHz}$  το νερό παρουσιάζει συντελεστή διάθλασης κοντά στην τιμή 80, αυτός μειώνεται σε τιμές που είναι  $\sim 2$  στην κλίμακα των THz. Αυτό συνεπάγεται μια ανακλαστικότητα ισχύος περίπου στο 11%. Η ανακλαστικότητα αυτή συγκρινόμενη με την απορρόφηση είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της, με αποτέλεσμα μια απεικονιστική μέθοδο υψηλής ευκρίνειας που βασίζεται κατά κύριο λόγο στην σκέδαση των ακτίνων THz από τους ιστούς.

Ένας άλλος κλάδος που οι ακτίνες στο πεδίο των THz έχουν ευρεία εφαρμογή είναι στη Ραδιοαστρονομία. Πιο συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι περίπου το μισό της ολικής φωτεινότητας και το 98% των φωτονίων που προέρχονται από το Big Bang υποβιβάζονται στη φασματική κλίμακα αυτή. Η ακτινοβολία αυτή αντιστοιχεί σε ακτινοβολία μέλανος σώματος  $10 - 140 \text{ K}$ . Ακόμη, σε αυτή την κλιμάκα βρίσκονται πολλά από τα φάσματα που εκπέμπονται από διάφορα ουράνια σώματα και πλανήτες.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η ακτινοβολία THz είναι εξαιρετικά σημαντική. Ωστόσο, από όλο τον εξοπλισμό που απαιτείται, το δυσκολότερα παραγόμενο τμήμα είναι οι φασματικές

πηγές. Οι παραδοσιακές ηλεκτρονικές συσκευές εμφανίζουν τόσο μεγάλες χωρητικότητες αλλά και απώλειες σε τόσο μεγάλες συχνότητες που είναι αδύνατο να λειτουργήσουν σε αυτές. Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί κατά καιρούς για την κατασκευή πηγών THz. Η πλέον επιτυχημένη είναι αυτή στην οποία βασίζεται και η προτεινόμενη Πολυκυματική Πηγή, δηλαδή στη μη – γραμμική παραγωγή υψηλής τάξης αρμονικών από χαμηλότερης συχνότητας αρχικές πηγές.

### **6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Η Πολυκυματική Πηγή που έχει δειχθεί ως τώρα έχει επιδείξει εξαιρετικά πειραματικά αποτελέσματα και επιτυγχάνει τον αρχικό σκοπό για τον οποίο είναι απαραίτητη. Ωστόσο, πολλές εναλλακτικές παραλλαγές της διάταξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να επιτευχθούν διαφορετικά αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, ορισμένες πιθανές αλλαγές θα μπορούσαν να επιφέρουν καλύτερη λειτουργία της πολυκυματικής πηγής. Έτσι οι προτάσεις για περαιτέρω μελέτη είναι:

- Εξέταση της λειτουργίας της Πολυκυματικής Πηγής με αρχική πηγή laser σε υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης, έστω για παράδειγμα 25 GHz. Ακόμη, σημαντική παράμετρος που θα πρέπει να εξεταστεί είναι η κατασκευή ενός laser με καλύτερες ιδιότητες πόλωσης.
- Μελέτη όσον αφορά την οπτική ίνα PCF και εύρεση του βέλτιστου μήκους αλλά και άλλων παραμέτρων της ίνας για την όσο δυνατόν μεγαλύτερη εξάπλωση του Supercontinuum, τη μέγιστη δυνατή σταθερότητα και την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης ισχύος.
- Εξέταση της πιθανής χρήσης συμβολόμετρων Fabry – Pérot με μεγαλύτερα FSR της τάξης των 200 GHz και 400 GHz.

- Ανύψωση του ρυθμού μετάδοσης από τα 10 στα 40 Gbps για την εξέταση της επίδοσης των φασματικών καναλιών σε υψηλότερους ρυθμούς.
- Εξερεύνηση της επίδοσης της πηγής σε συνθήκες δικτύου DWDM με την πραγματοποίηση πειράματος μετάδοσης και αναγέννησης σε ενδιάμεσους κόμβους.
- Διερεύνηση της πιθανότητας για επιπλέον συμπίεση των παλμών πριν την είσοδο στην PCF. Αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια μιας οπτικής ίνας με εφαρμογή γραμμικής συμπίεσης λόγω του αρχικού chirp του παλμού.
- Μελέτη της Πολυκυματικής Πηγής ως οπτικής πηγής παραγωγής σημάτων THz. Για την επίτευξη αυτού είναι αναγκαία η απομόνωση κάποιων καναλιών και ο ανασυνδυασμός τους με σκοπό την παραγωγή του επιθυμητού σήματος.
- Διερεύνηση της ικανότητας της πηγής για ανύψωση του ρυθμού επανάληψης ενός αρχικού laser.

## **6.4 Αναφορές 6<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**

- [1] Jun Ye and Steven T. Cundiff, “*Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications*”, Springer Science + Business Media, Inc., Boston, 2005
  
- [2] Joseph M. Schmitt. “*Optical Coherence Tomography (OCT): A Review*”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 5, No. 4, pp 1205-1215, Jul/Aug 1999
  
- [3] I. Hartl et al., “*Ultra high-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air - silica microstructure optical fiber*”, Optics Letters, Vol. 26, no. 9, pp. 608–610, May 2001
  
- [4] Peter H. Siegel, “*Terahertz Technology*”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 50, No. 3, pp 910-928, Mar. 2002
  
- [5] Peter H. Siegel, “*Terahertz Technology in Biology and Medicine*”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 52, No. 10, pp 2438-2447, Oct. 2004



# **Παράρτημα Α**

## **Πίνακας απεικόνισης πλέγματος ITU για συστήματα DWDM**

## ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

	L-Band				C-Band				S-Band			
	100 GHz Grid		50 GHz Offset		100 GHz Grid		50 GHz Offset		100 GHz Grid		50 GHz Offset	
	THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm
1	186.00	1611.79	186.05	1611.35	191.00	1569.59	191.05	1569.18	196.00	1529.55	196.05	1529.16
2	186.10	1610.92	186.15	1610.49	191.10	1568.77	191.15	1568.36	196.10	1528.77	196.15	1528.38
3	186.20	1610.06	186.25	1609.62	191.20	1567.95	191.25	1567.54	196.20	1527.99	196.25	1527.60
4	186.30	1609.19	186.35	1608.76	191.30	1567.13	191.35	1566.72	196.30	1527.22	196.35	1526.83
5	186.40	1608.33	186.45	1607.90	191.40	1566.31	191.45	1565.90	196.40	1526.44	196.45	1526.05
6	186.50	1607.47	186.55	1607.04	191.50	1565.50	191.55	1565.09	196.50	1525.66	196.55	1525.27
7	186.60	1606.60	186.65	1606.17	191.60	1564.68	191.65	1564.27	196.60	1524.89	196.65	1524.50
8	186.70	1605.74	186.75	1605.31	191.70	1563.86	191.75	1563.45	196.70	1524.11	196.75	1523.72
9	186.80	1604.88	186.85	1604.46	191.80	1563.05	191.85	1562.64	196.80	1523.34	196.85	1522.95
10	186.90	1604.03	186.95	1603.60	191.90	1562.23	191.95	1561.83	196.90	1522.56	196.95	1522.18
11	187.00	1603.17	187.05	1602.74	192.00	1561.42	192.05	1561.01	197.00	1521.79	197.05	1521.40
12	187.10	1602.31	187.15	1601.88	192.10	1560.61	192.15	1560.20	197.10	1521.02	197.15	1520.63
13	187.20	1601.46	187.25	1601.03	192.20	1559.79	192.25	1559.39	197.20	1520.25	197.25	1519.86
14	187.30	1600.60	187.35	1600.17	192.30	1558.98	192.35	1558.58	197.30	1519.48	197.35	1519.09
15	187.40	1599.75	187.45	1599.32	192.40	1558.17	192.45	1557.77	197.40	1518.71	197.45	1518.32
16	187.50	1598.89	187.55	1598.47	192.50	1557.36	192.55	1556.96	197.50	1517.94	197.55	1517.55
17	187.60	1598.04	187.65	1597.62	192.60	1556.55	192.65	1556.15	197.60	1517.17	197.65	1516.78
18	187.70	1597.19	187.75	1596.76	192.70	1555.75	192.75	1555.34	197.70	1516.40	197.75	1516.02
19	187.80	1596.34	187.85	1595.91	192.80	1554.94	192.85	1554.54	197.80	1515.63	197.85	1515.25
20	187.90	1595.49	187.95	1595.06	192.90	1554.13	192.95	1553.73	197.90	1514.87	197.95	1514.49
21	188.00	1594.64	188.05	1594.22	193.00	1553.33	193.05	1552.93	198.00	1514.10	198.05	1513.72
22	188.10	1593.79	188.15	1593.37	193.10	1552.52	193.15	1552.12	198.10	1513.34	198.15	1512.96
23	188.20	1592.95	188.25	1592.52	193.20	1551.72	193.25	1551.32	198.20	1512.58	198.25	1512.19
24	188.30	1592.10	188.35	1591.68	193.30	1550.92	193.35	1550.52	198.30	1511.81	198.35	1511.43
25	188.40	1591.26	188.45	1590.83	193.40	1550.12	193.45	1549.72	198.40	1511.05	198.45	1510.67
26	188.50	1590.41	188.55	1589.99	193.50	1549.32	193.55	1548.91	198.50	1510.29	198.55	1509.91
27	188.60	1589.57	188.65	1589.15	193.60	1548.51	193.65	1548.11	198.60	1509.53	198.65	1509.15
28	188.70	1588.73	188.75	1588.30	193.70	1547.72	193.75	1547.32	198.70	1508.77	198.75	1508.39
29	188.80	1587.88	188.85	1587.46	193.80	1546.92	193.85	1546.52	198.80	1508.01	198.85	1507.63
30	188.90	1587.04	188.95	1586.62	193.90	1546.12	193.95	1545.72	198.90	1507.25	198.95	1506.87
31	189.00	1586.20	189.05	1585.78	194.00	1545.32	194.05	1544.92	199.00	1506.49	199.05	1506.12
32	189.10	1585.36	189.15	1584.95	194.10	1544.53	194.15	1544.13	199.10	1505.74	199.15	1505.36
33	189.20	1584.53	189.25	1584.11	194.20	1543.73	194.25	1543.33	199.20	1504.98	199.25	1504.60
34	189.30	1583.69	189.35	1583.27	194.30	1542.94	194.35	1542.54	199.30	1504.23	199.35	1503.85
35	189.40	1582.85	189.45	1582.44	194.40	1542.14	194.45	1541.75	199.40	1503.47	199.45	1503.10
36	189.50	1582.02	189.55	1581.60	194.50	1541.35	194.55	1540.95	199.50	1502.72	199.55	1502.34
37	189.60	1581.18	189.65	1580.77	194.60	1540.56	194.65	1540.16	199.60	1501.97	199.65	1501.59
38	189.70	1580.35	189.75	1579.93	194.70	1539.77	194.75	1539.37	199.70	1501.21	199.75	1500.84
39	189.80	1579.52	189.85	1579.10	194.80	1538.98	194.85	1538.58	199.80	1500.46	199.85	1500.09
40	189.90	1578.69	189.95	1578.27	194.90	1538.19	194.95	1537.79	199.90	1499.71	199.95	1499.34
41	190.00	1577.86	190.05	1577.44	195.00	1537.40	195.05	1537.00	200.00	1498.96	200.05	1498.59
42	190.10	1577.03	190.15	1576.61	195.10	1536.61	195.15	1536.22	200.10	1498.21	200.15	1497.84
43	190.20	1576.20	190.25	1575.78	195.20	1535.82	195.25	1535.43	200.20	1497.46	200.25	1497.09
44	190.30	1575.37	190.35	1574.95	195.30	1535.04	195.35	1534.64	200.30	1496.72	200.35	1496.34
45	190.40	1574.54	190.45	1574.13	195.40	1534.25	195.45	1533.86	200.40	1495.97	200.45	1495.60
46	190.50	1573.71	190.55	1573.30	195.50	1533.47	195.55	1533.07	200.50	1495.22	200.55	1494.85
47	190.60	1572.89	190.65	1572.48	195.60	1532.68	195.65	1532.29	200.60	1494.48	200.65	1494.11
48	190.70	1572.06	190.75	1571.65	195.70	1531.90	195.75	1531.51	200.70	1493.73	200.75	1493.36
49	190.80	1571.24	190.85	1570.83	195.80	1531.12	195.85	1530.72	200.80	1492.99	200.85	1492.62
50	190.90	1570.42	190.95	1570.01	195.90	1530.33	195.95	1529.94	200.90	1492.25	200.95	1491.88

Οι τρεις ζώνες καναλιών όπως έχουν οριστεί από την ITU με αποστάσεις 50 και 100 GHz για DWDM συστήματα



# **Παράρτημα Β**

**Συγκεντρωτικοί Κατάλογοι Σχημάτων,  
Διαγραμμάτων και Πινάκων**



**Κατάλογος Σχημάτων:**

- Σχήμα 1.1: Η δομή ενός συστήματος 3R [5]  
 Σχήμα 1.2: Η δομή ενός συστήματος με ενίσχυση [5]  
 Σχήμα 1.3: Τεχνικές πολυπλεξίας για αύξηση της χωρητικότητας μετάδοσης (α) OTDM (b) WDM [1]  
 Σχήμα 1.4: Αρχιτεκτονική δικτύου WDM δρομολόγησης μήκους κύματος. Οι χρήστες του δικτύου μπορούν να είναι IP routers ή τερματικά SONET. [1]  
 Σχήμα 1.5: Αρχιτεκτονική Δικτύου DWDM  
 Σχήμα 1.6: Σχηματική αναπαράσταση δικτύου μεταγωγής εκρηκτικής ροής [10]  
 Σχήμα 1.7: Σχηματική αναπαράσταση δικτύου μεταγωγής ετικέτας MPLS  
 Σχήμα 1.8: Σχηματική απεικόνιση του μελλοντικού οπτικού δικτύου. [8]  
 Σχήμα 1.9: Τοπολογίες Πιθανών Σεναρίων FTTH [23]  
 Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση ζεύξης σημείου-προς-σημείο [1]  
 Σχήμα 2.2: Αρχιτεκτονικές *Lambdanet* και Παθητικού Οπτικού Τοπικού βρόχου [15], [16]  
 Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση του συμβολόμετρου *Mach – Zehnder* [1]  
 Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση Συμβολόμετρου *Sagnac* [21]  
 Σχήμα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση Ενισχυτή *Raman*  
 Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας OADM [14]  
 Σχήμα 2.7: Δρομολογητής Μήκους Κύματος  
 Σχήμα 2.8: Γενική αρχή λειτουργίας Μετατροπέα Μήκους Κύματος  
 Σχήμα 2.9: Αναπαράσταση Οπτικού Στοιχείου Διασύνδεσης (OXC)  
 Σχήμα 2.10: Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου  
 Σχήμα 2.11: Μελλοντικό Οπτικό Δίκτυο  
 Σχήμα 2.12: Πομπός OTDM με γραμμές χρονικής καθυστέρησης  
 Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση κοιλότητας *laser DFB* και *DBR* [2]  
 Σχήμα 3.2: Διάγραμμα μιας απλουστευμένης δομής VCSEL [4]  
 Σχήμα 3.3: Πολυσυχνοτικό *laser* με WGR και το αντίστοιχο φάσμα [11]  
 Σχήμα 3.4: Γενική δομή Πολυκυματικής Πηγής  
 Σχήμα 3.5: Εξέλιξη παλμού *Gauss* χωρίς αρχικό *chirp* και του αντίστοιχου φάσματος υπό καθεστώς SPM και GVD για  $\beta_2 > 0$  και  $\beta_2 < 0$  σε απόσταση  $z = 5L_D$  [21]  
 Σχήμα 3.6: Τεχνική Δημιουργίας *Supercontinuum* και Φάσματα για διάφορες τιμές της ισχύος εισόδου (a) 45 mW (b) 140 mW (c) 210 mW [23]  
 Σχήμα 3.7: Υλοποίηση *Supercontinuum* με τη βοήθεια κοινών SMF και DSF ινών.  
 Σχήμα 3.8: Δομή οπτικής ίνας PCF με παραμέτρους  $d$  και  $\Lambda$  [28]  
 Σχήμα 3.9: WDM splitter/combiner 8-σε-1 με ενίσχυση [31]  
 Σχήμα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση ενός AWG [33]  
 Σχήμα 4.1: Τα βασικά στοιχεία της πειραματικής διάταξης  
 Σχήμα 4.2: Κοιλότητα *Laser*  
 Σχήμα 4.3: Σταθερά κέρδους και μετατόπιση φάσης ενός *laser* [2]  
 Σχήμα 4.4: Έξοδος *Laser* με Κλειδωμένους Τρόπους Ταλάντωσης [2]  
 Σχήμα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση κοιλότητας *mode locked laser* [4]  
 Σχήμα 4.6: *Actively Mode Locked* Παλμός και εξάρτηση του κέρδους [5]  
 Σχήμα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση *passive mode locking*  
 Σχήμα 4.8: Κοιλότητα *Laser* τύπου ERGO  
 Σχήμα 4.9: Τυπική δομή SESAM με τον αντίστοιχο δείκτη διάθλασης [6]  
 Σχήμα 4.10: Προφίλ δείκτη διάθλασης κοινής SMF ίνας [8]  
 Σχήμα 4.11: Τομή οπτικής ίνας PCF  
 Σχήμα 4.12: Τομή της PCF του πειράματος  
 Σχήμα 4.13: Φαινόμενα Συμβολής που προκαλούνται από Διαίρεση Πλάτους  
 Σχήμα 4.14: Δομή Κοιλότητας FP και Ενταση του Ηλεκτρικού Πεδίου έπειτα από κάθε ανάκλαση  
 Σχήμα 4.15: Διάταξη για Διπλή Διέλευση μέσα από μια κοιλότητα *Fabry - Pérot*  
 Σχήμα 4.16: Κύκλωμα Ανάκτησης Ρολογιού με χρήση *Fabry - Pérot*  
 Σχήμα 4.17: Αύξηση του ρυθμού Επανάληψης  
 Σχήμα 4.18: Σύγκριση Παλμών *Gauss* και *Sech*  
 Σχήμα 5.1: Πειραματική Διάταξη  
 Σχήμα 5.2: Διάταξη για τη λήψη μετρήσεων  
 Σχήμα 5.3: Αποσυντονισμός του FP με το ρυθμό επανάληψης του *laser* για διάφορες τιμές του  $\Delta f$   
 Σχήμα 5.4: *Supercontinuum* που προκύπτει για  $L = 50$  m και 125 m σε εύρος ίσο με την  $C$  μπάνα και τις  $C$ ,  $S$  και  $L$  μπάνα ες της ITU  
 Σχήμα 5.5: *Supercontinuum* που προκύπτει για  $L = 50$  m και *Peak Power* 13 και 37W σε εύρος ίσο με την  $C$  μπάνα και τις  $C$ ,  $S$  και  $L$  μπάνες της ITU  
 Σχήμα 5.6: Μεταβλητότητα του φάσματος εισόδου της Πολυκυματικής Πηγής  
 Σχήμα 5.7: Σταθερότητα του φάσματος εξόδου για όλες τις πιθανές εναλλακτικές  
 Σχήμα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση Διάταξης OCT με Συμβολόμετρο *Michelson* [2]



**Κατάλογος Διαγραμμάτων:**

- Διάγραμμα 1.1: Οι περιοχές χαμηλής εξασθένισης της οπτικής ίνας [3]
- Διάγραμμα 2.1: Συνάρτηση μεταφοράς του συμβολόμετρου *Fabry – Perot* για διάφορες τιμές του  $R$
- Διάγραμμα 4.1: Συγκριτικό διάγραμμα δημιουργίας  $SC$  μεταξύ  $PCF$  και άλλων μέσων [9]
- Διάγραμμα 4.2: *Supercontinuum* που προέρχεται από  $PCF$  για διάφορες τιμές της ισχύος εισόδου. Το εύρος των παλμών εισόδου είναι 2 ps. [24]
- Διάγραμμα 4.3: Καμπύλες Διασποράς και Εξασθένισης της  $PCF$  (1480 – 1660 nm)
- Διάγραμμα 4.4: Συνάρτηση Μεταφοράς Συμβολόμετρου  $FP$  για διάφορες τιμές της ανακλαστικότητας  $R$ .
- Διάγραμμα 4.5: Γραφική Παράσταση της  $F(R)$
- Διάγραμμα 5.1: Φάσμα Εισόδου της πηγής *ERGO laser*
- Διάγραμμα 5.2: *Supercontinuum* σε εύρος που καλύπτει την  $C$  μπάντα της  $ITU$  ( $L_{PCF} = 50$  m)
- Διάγραμμα 5.3: *Supercontinuum* σε εύρος που καλύπτει την  $C$  μπάντα της  $ITU$  ( $L_{PCF} = 100$  m)
- Διάγραμμα 5.4: *Supercontinuum* σε εύρος που καλύπτει τις  $S$ ,  $C$  και  $L$  μπάντες της  $ITU$  ( $L_{PCF} = 50$  m)
- Διάγραμμα 5.5: *Supercontinuum* προερχόμενο από μια  $DFB$  πηγή *laser*
- Διάγραμμα 5.6: Εξάρτηση Εξάπλωσης *Supercontinuum* με την πόλωση (a)ελάχιστη (b)μέγιστη
- Διάγραμμα 5.7: Φάσμα Εξόδου της διάταξης σε όλη την  $C$  μπάντα ( $FSR = 50$  GHz)
- Διάγραμμα 5.8: Φάσμα Εξόδου της διάταξης σε όλη την  $C$  μπάντα ( $FSR = 100$  GHz)
- Διάγραμμα 5.9: Φάσμα Εξόδου της διάταξης σε όλη τη ζώνη μετάδοσης των 1550 nm ( $FSR = 100$  GHz)
- Διάγραμμα 5.10: Απομόνωση καναλιού της πολυκυματικής πηγής στα 1558,17 nm
- Διάγραμμα 5.11: Μικροκυματικά φάσματα εισόδου και εξόδου ( $FSR = 50$  GHz)
- Διάγραμμα 5.12: Μικροκυματικά φάσματα εξόδου ( $FSR = 50$  GHz)
- Διάγραμμα 5.13: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1535.82$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.14: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1540.16$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.15: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1544.13$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.16: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1549.32$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.17: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1557.77$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.18: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1558.17$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.19: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1558.69$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.20: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1549.32$  nm και  $FSR = 50$  GHz (*DFB laser*)
- Διάγραμμα 5.21: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1535.82$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.22: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1540.56$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.23: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1544.53$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.24: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1549.32$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.25: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1557.36$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.26: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1558.17$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.27: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1569.59$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.28: *Eye Diagram* για  $\lambda = 1549.32$  nm και  $FSR = 100$  GHz (*DFB laser*)
- Διάγραμμα 5.29: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1540.16$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.30: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1544.13$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.31: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1549.32$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.32: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1557.77$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.33: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1558.17$  nm και  $FSR = 50$  GHz
- Διάγραμμα 5.34: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1549.32$  nm και  $FSR = 50$  GHz (*DFB laser*)
- Διάγραμμα 5.35: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1535.82$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.36: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1540.56$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.37: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1544.53$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.38: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1549.32$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.39: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1557.36$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.40: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1558.17$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.41: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1569.59$  nm και  $FSR = 100$  GHz
- Διάγραμμα 5.42: Μετρήσεις  $BER$  για  $\lambda = 1549.32$  nm και  $FSR = 100$  GHz (*DFB laser*)
- Διάγραμμα 5.43: Συγκριτικό Διάγραμμα μετρήσεων  $BER$  ( $FSR = 50$  GHz)
- Διάγραμμα 5.44: Συγκριτικό Διάγραμμα μετρήσεων  $BER$  ( $FSR = 100$  GHz)



**Κατάλογος Πινάκων:**

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά *Laser ERGO*

Πίνακας 4.2: Φυσικά Χαρακτηριστικά της *PCF*

Πίνακας 4.3: Οπτικά Χαρακτηριστικά της *PCF*

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά Συμβολόμετρων *Fabry - Pérot*

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1540.16$  και  $FSR = 50$  GHz

Πίνακας 5.2: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1544.13$  και  $FSR = 50$  GHz

Πίνακας 5.3: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 50$  GHz

Πίνακας 5.4: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1557.77$  και  $FSR = 50$  GHz

Πίνακας 5.5: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1558.17$  και  $FSR = 50$  GHz

Πίνακας 5.6: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 50$  GHz (*DFB laser*)

Πίνακας 5.7: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1535.82$  και  $FSR = 100$  GHz

Πίνακας 5.8: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1540.56$  και  $FSR = 100$  GHz

Πίνακας 5.9: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1544.53$  και  $FSR = 100$  GHz

Πίνακας 5.10: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 100$  GHz

Πίνακας 5.11: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1557.36$  και  $FSR = 100$  GHz

Πίνακας 5.12: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1558.17$  και  $FSR = 100$  GHz

Πίνακας 5.13: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1559.69$  και  $FSR = 100$  GHz

Πίνακας 5.14: Μετρήσεις *BER* για  $\lambda = 1549.32$  και  $FSR = 100$  GHz (*DFB laser*)

Πίνακας 6.1: Σύγκριση Πολυκυματικής Πηγής με εμπορικά διαθέσιμα *DFB laser*

